



EMPRESA ERNESTO CHE GUEVARA
GRUPO EMPRESARIAL DEL NÍQUEL. MINBAS.
Carretera Moa-Baracoa km 5. CP. 83330.
Moa. Holguín. CUBA.

Tesis Maestría Electromecánica

Título de la Investigación:

***METODOLOGÍA PARA EL DIAGNÓSTICO
VIBRO-ELÉCTRICO DE MOTORES DE
INDUCCIÓN***

Autor:

Ing. Elvis Suárez Lores

Tutor:

Dr. Ing. Evelio Palomino Marín

Consultor:

MSc. Ing. Jorge Luis Reyes de la Cruz

Holguín

2008



AGRADECIMIENTOS

Especial agradecimiento a los tutores Evelio Palomino y Jorge Reyes por su apoyo y tiempo dedicado.

Agradecimiento especial también al claustro de profesores que pusieron su granito de arena, compartiendo sus conocimientos.

Agradecimiento a todos aquellos que de una manera u otra tuvieron que ver con la realización y éxito de este trabajo.



DEDICATORIA

Dedicado este proyecto a los que día a día trabajan en la gestión del mantenimiento, especialmente a los que se dedican al mantenimiento predictivo y a los analistas de vibraciones, en la búsqueda de soluciones a problemas.



RESUMEN

El presente proyecto de investigación tuvo como objetivo elaborar una metodología a través de la compilación de datos para la detección precoz de fallos en los motores eléctricos mediante el diagnóstico vibro-eléctrico, realizando la combinación e integración del análisis del comportamiento vibratorio del motor y su comportamiento o desempeño eléctrico, radicando aquí justamente, el aporte de este trabajo de investigación.

El proyecto contempló el diagnóstico a través de dos comportamientos: el mecánico dinámico (vibraciones) y el electrodinámico (distorsión en la intensidad de la corriente de alimentación), utilizando como premisa, realizar el diagnóstico de manera no invasiva y equipo en funcionamiento.

Al obtenerse la metodología, la misma se aplicó en casos de motores con problemas reales, los cuales se diagnosticaron vibro-eléctricamente, mostrando la efectividad de la metodología propuesta.



INDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	7
I. MARCO TEÓRICO.....	11
I.1 Introducción.....	12
I.2 Motores eléctricos de inducción.....	12
I.3 Métodos tradicionales de diagnóstico y mantenimiento de máquinas eléctricas rotativas.....	14
I.4 Situación actual.....	20
I.5 Trabajos precedentes.....	22
I.6 Fundamentos y diseño metodológico del proyecto.....	27
II. ESTRATEGIA Y ANÁLISIS DE DEFECTOS EN MOTORES DE INDUCCIÓN.....	30
II.1 Introducción.....	31
II.2 Mantenimiento predictivo en motores de inducción.....	32
II.3 Diagnóstico por análisis de vibraciones.....	32
II.3.1 Causas más frecuentes de vibraciones en motores inducción.....	40
II.4 Acerca del análisis espectral de corriente.....	49
II.4.1 Fuentes Mecánicas de Vibraciones Típicas en Motores.....	51
II.4.2 Fuentes de Vibraciones Eléctricas en Motores.....	53
II.4.3 Monitoreo de la Barra del Rotor para Análisis Espectral de Corriente.....	54
II.4.4 Fundamentos cualitativos y análisis de la señal de corriente en motores eléctricos.....	56
III. METODOLOGÍA DE DIAGNOSTICO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	60
III.1 Introducción.....	61
III.2 Metodología para el diagnóstico vibro-eléctrico.....	61
III.2.1 Medición de la intensidad vibratoria del motor y evaluación del estado Técnico del motor.....	62



	Pág.
III.2.2 Análisis frecuencial de las vibraciones y detección presencia de problemas Eléctricos.....	63
III.2.3 Evaluación y diagnóstico mediante el Análisis de Señal de Corriente en Motores Eléctricos (MCSA)	66
III.2.4 Identificar y evaluar los problemas mecánicos mediante análisis de vibraciones	74
III.2.5 Planificar corrección y ejecución de las tareas.....	79
III.2.6 Control de calidad y registro.....	80
III.3 Ensayos experimentales.....	81
III.4 Análisis y discusión de los resultados.....	90
IV. VALORACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA Y AMBIENTAL.....	93
IV-1 Introducción.....	94
IV-2 Valoración técnica-económica.....	94
IV-3 Impacto ambiental.....	98
CONCLUSIONES.....	102
RECOMENDACIONES.....	103
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104



INTRODUCCION



Introducción:

El motor de inducción es uno de los equipos eléctricos de mayor aplicación en el ámbito industrial. Muchos de estos motores se utilizan en la industria minera, en donde una falla repentina puede tener graves consecuencias, por lo que resulta necesario asegurar su continuidad operativa mediante la detección oportuna de fallas incipientes originadas por los esfuerzos eléctricos, mecánicos y térmicos.

Conocer a tiempo una falla incipiente permite planear retirar el motor con fines de mantenimiento y reducir pérdidas de producción.

Situación Problemática:

“Para cualquier industria de producción continua, y en especial para nuestra planta niquelífera, el comportamiento, desempeño y eficiencia de los motores de inducción resulta crítico por cuanto tales máquinas constituyen accionamientos principales en más del 90% de los equipos de las plantas. Por tal motivo, y aunque se emplean técnicas moderadas para controlar el estado técnico de tales activos, la industria cubana en general y en particular la industria del níquel, enfrentan problemas serios en el diagnóstico de motores de inducción de modo no invasivo” E. Palomino 2007.

En nuestra empresa los motores de inducción constituyen accionamientos principales en la mayoría de las máquinas de las plantas y existe insuficiencias en el diagnóstico a través del empleo de tecnologías predictivas y de diagnóstico de manera no invasiva, no contándose con una metodología definida para la realización de dicho diagnóstico.

Problema:

No existe definida una metodología para el diagnóstico vibro-eléctrico de los motores de inducción mediante técnicas de análisis espectral.

Objetivo general:

Establecer el uso de las técnicas de análisis frecuencial para el diagnóstico del estado técnico de los motores de inducción.



Objetivos Específicos:

- 1- Elaborar una metodología para diagnosticar problemas en los motores de inducción tipo jaula de ardilla.
- 2- Aplicación práctica de la metodología en el proceso de diagnóstico vibroeléctrico.

Objeto de estudio:

Motores de inducción del tipo jaula de ardilla de media potencia en la fábrica Ernesto Che Guevara. Tecnología de diagnóstico de motores de inducción.

Campo de Acción:

Metodología para el diagnóstico de los motores de inducción con rotor tipo jaula de ardilla, estacionarios, mediante el análisis espectral de vibraciones e intensidad de corriente eléctrica.

Hipótesis:

Si se cuenta con una metodología de diagnóstico vibro-eléctrico para los motores de inducción con rotor tipo jaula de ardilla, estacionarios, es posible conocer su estado técnico y predecir su comportamiento futuro.

Tareas de Investigación:

1. Búsqueda de información actualizada sobre el tema.
2. Descripción de las técnicas de diagnóstico de motores de inducción.
3. Elaboración de la metodología para diagnóstico de los motores de inducción tipo jaula de ardilla.
4. Selección de las máquinas en cuyo motor de inducción tendrá lugar los ejercicios experimentales y el proceso de diagnóstico.
5. Discusión y análisis de los resultados obtenidos.
6. Valoración técnico-económica del trabajo.



Se plantea como ***novedad científica***:

Diagnóstico de motores eléctricos mediante la combinación e integración del análisis del comportamiento vibratorio del motor y su comportamiento o desempeño eléctrico, utilizando técnicas de análisis frecuencial.

Aportes Metodológicos

- Se establece una metodología para el diagnóstico de problemas eléctricos y mecánicos de los motores de inducción, pudiendo generalizarse la aplicación de la misma a otros equipos.
- Se manifiesta la necesidad de utilizar métodos menos invasivos e intervención del equipo en funcionamiento.
- La metodología de diagnóstico propuesta puede ser introducida en temas de asignaturas afines de las carreras de mecánicas, así como para la implementación de un programa de mantenimiento predictivo.

Valor práctico

- La aplicación de la metodología obtenida permite determinar el comportamiento de los motores y valores de sus parámetros.
- La aplicación de esta metodología permite estimar el estado técnico en función del análisis de vibraciones y el de corriente.
- La investigación permite disminuir los costos mediante la reducción del consumo energético por desperfectos en los motores.



CAPITULO I.

MARCO TEORICO



I.1 Introducción

Las máquinas eléctricas de inducción son piezas fundamentales en todo proceso productivo y por lo tanto requieren de un excelente mantenimiento y unas condiciones aceptables de operación para poder cumplir efectivamente con los objetivos globales de una planta.

Las más empleadas en la industria moderna son las de inducción con jaula de ardilla en virtud de su bajo costo, robustez y economía de mantenimiento. Este tipo de máquinas es susceptible a distintos fallos de carácter eléctrico y mecánico [1]. Entre las más importantes pueden distinguirse los fallos en rodamientos o en el eje del rotor, en los devanados de estator y en las barras o anillos de cortocircuito del rotor.

I.2 Motores eléctricos de inducción

Dentro de la industria los motores eléctricos son uno de los componentes claves de la producción, muchos de ellos son vitales para el funcionamiento continuo de la planta.

Por ello, la necesidad de que las operaciones de los motores sean correctas se ha visto incrementada. Ello ha provocado que los motores sean un foco de atención de los programas de mantenimiento, entre ellos los de mantenimiento predictivo.

En líneas generales, puede afirmarse que aproximadamente un 41 % de los fallos en este tipo de máquinas corresponde a anomalías en los rodamientos, entre un 30 y un 37 % a fallos en el estator y un 10 % aproximadamente corresponden a fallos en el rotor (el resto de los casos se distribuyen en una gran variedad de fallos) [2]. Estos datos fueron tomados a partir del análisis de máquinas de una gran variedad de potencias.

La ilustración muestra un estudio realizado entre el Electric Power Research Institute (EPRI) y General Electric. El propósito de este estudio fue el mostrar las verdaderas fuentes de falla en motores eléctricos.

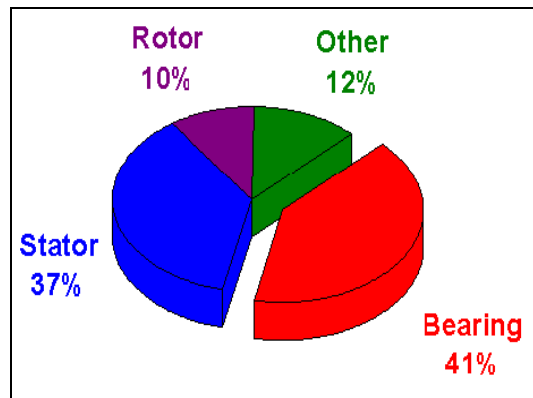


Figura 1: Estudio sobre las fuentes de falla en motores eléctricos [2].

El mantenimiento es la preservación de la vida útil de la maquinaria y por lo tanto constituye una parte integral de la actividad de la empresa que garantiza la disponibilidad de los activos productivos.

El mantenimiento predictivo es una filosofía que ha sido ampliamente difundida en el sector productivo internacional y en especial en equipos en movimiento como las máquinas eléctricas [3]. Para estas últimas, se han desarrollado variadas técnicas de diagnóstico [4-5], pero las más aplicadas son las que involucran análisis de vibraciones [3, 7], análisis espectral de corriente [7], análisis del flujo axial de dispersión [8] y las más recientes que combinan modelos de simulación del comportamiento de las fallas [9] y la aplicación de redes neuronales artificiales para identificar las fallas entre espiras del estator [10].

Exceptuando el análisis de vibraciones, no se ha generalizado la aplicación de estas técnicas de diagnóstico en motores de inducción a nivel industrial, encontrándose muchas de ellas en fase experimental; sin embargo, es de sumo interés profundizar en su estudio porque teóricamente aventajan a los métodos convencionales en la facilidad de aplicación y en su sensibilidad para la detección de averías.



I.3 Métodos tradicionales de diagnóstico y mantenimiento de máquinas eléctricas rotativas

La mayoría de las fallas a las cuales se ven sometidas las máquinas eléctricas están relacionadas con los daños en el aislamiento del estator que llegan a convertirse en cortocircuitos entre espiras y que por lo tanto traen como consecuencia la pérdida de vida útil del motor.

Para determinar el estado del aislamiento se emplean diferentes técnicas de diagnóstico en las que no todos sus objetivos coinciden, ya que ninguna puede determinar por sí sola el estado de los devanados por lo que se hace necesario llevar a cabo el conjunto de pruebas para la evaluación del estado integral del aislamiento. Cabe resaltar que estas pruebas se realizan con la máquina fuera de servicio y en algunas de ellas se puede superar la tensión nominal lo que puede llevar al fallo de aislamientos con cierto grado de deterioro. Entre este tipo de pruebas están:

- Ensayos con tensión continua, tales como, índice de polarización, resistencia de aislamiento y ensayos de sobre tensión.
- Ensayos de ondas de choque
- Ensayos de tangente delta
- Ensayos de descargas parciales

También existen otros tipos de métodos de diagnóstico, que si bien no son invasivos ya se consideran como tradicionales, estos métodos son:

Análisis espectral de vibraciones

En una máquina rotativa, teóricamente perfecta, no debería existir ninguna vibración porque todas las fuerzas presentes en la máquina estarían compensadas. Sin embargo, todas las máquinas rotativas están sometidas a ciertos niveles de vibración, porque debido a sus imperfecciones constructivas, aparecen desequilibrios y desalineaciones residuales, desgastes, fricciones y, en definitiva, todo tipo de fuerzas no compensadas [3]. Por otro lado, la existencia de averías en algún componente del sistema provoca la aparición de fuerzas, que pueden ser de origen eléctrico, mecánico,



o debidas al proceso físico en el que está implicada la máquina. Todas ellas incrementan el nivel global de vibración o modifican las frecuencias de vibración ya existentes.

Las principales causas de vibración en una máquina eléctrica son:

- La respuesta del núcleo del estator a la fuerza atractiva desarrollada entre el rotor y estator.
- La reacción de los devanados terminales del estator a las fuerzas electromagnéticas sobre los conductores.
- El comportamiento dinámico del rotor.
- La respuesta de los rodamientos del eje a la vibración transmitida desde el rotor.

El análisis de vibraciones es, probablemente, el primer método aplicado y el más extendido de todos los utilizados en el mantenimiento predictivo.

Aunque la práctica demuestra que su validez es muy limitada para la detección de fallos de origen eléctrico, la mayor parte de las anomalías mecánicas de las máquinas rotativas pueden ser diagnosticadas si se efectúa un correcto análisis de su espectro de vibración.

Actualmente, se están realizando algunos intentos por definir las frecuencias características de vibración asociadas a algunos defectos de origen eléctrico. La teoría predice que los cambios en la corriente debido al deterioro eléctrico de los devanados en las máquinas rotativas, alterarán las fuerzas magnéticas internas, las cuales causarán una modificación en las características vibratorias de la máquina [3].

Para hallar las relaciones matemáticas existentes entre la corriente eléctrica que fluye a través de los devanados y las vibraciones mecánicas de la máquina se utiliza la teoría de la onda de permeancia [6].

Análisis espectral de corriente

El análisis espectral de corriente constituye un complemento para el diagnóstico mediante vibraciones ya que esta última tiene limitaciones al detectar problemas eléctricos en estado incipiente tales como excentricidades en el entrehierro,



cortocircuitos entre espiras en el devanado del estator y barras rotas en los rotores de los motores de inducción causadas por esfuerzos mecánicos, magnéticos o térmicos. Para la detección y monitoreo de cortocircuitos entre espiras en el devanado estático de los motores de inducción, empleando el análisis espectral de corrientes, se parte de una aproximación de la onda rotativa, la cual explica los armónicos de fuerza magnetomotriz producidos por las ranuras del rotor, del estator y por la saturación de los materiales que componen dicha máquina [7].

Otro aspecto importante, es que el cortocircuito entre espiras tiene el efecto de disminuir la fuerza magnetomotriz en la vecindad de la falla, el devanado de fase tiene menos vueltas y porque la fuerza magnetomotriz generada por la corriente de cortocircuito es opuesta a la fuerza magnetomotriz generada por la corriente del devanado de fase.

Nuevos métodos de diagnóstico en motores eléctricos de inducción

Las espiras y todas las bobinas del estator que forman un polo en una máquina de inducción son conectadas generalmente en serie. Si un cortocircuito entre espiras ocurre en una de las bobinas, aparece un nuevo camino para el flujo de corriente, paralelo al primero. La aparición de este segundo camino causa una reducción en la impedancia de la bobina, debido a que dos espiras que antes estaban conectadas en serie ahora aparecen conectadas en paralelo.

La principal consecuencia de esto es el incremento de la corriente total que fluye a través de esta sección del devanado. Como esta corriente adicional circula por todo el resto del devanado, ocasiona un incremento de la temperatura de los conductores y por ende un deterioro progresivo en el aislamiento de la máquina [7].

El efecto de una falla en el aislamiento es la eliminación de una espira o un grupo de espiras del bobinado del estator. Esta será una pequeña consecuencia que se verá reflejada en la distribución del flujo en el entrehierro. Además en la espira



cortocircuitada se inducirá una FEM que ocasionará un flujo de corriente limitado sólo por la impedancia de la espira en corto. La corriente de falla es la fuente de unos pulsos magnetomotriz que posee una distribución de armónicos espaciales que se superponen a la distribución del campo principal.

Por lo que se hace tan importante el estudio y conocimiento de los métodos de diagnóstico existentes para la detección de fallas incipientes en los devanados de las máquinas. Todos estos métodos tienen la ventaja de ser aplicados mientras la máquina se encuentra en operación, es decir, que no se requiere interrumpir su ciclo normal de trabajo para diagnosticar y dar a conocer el verdadero estado en el que se encuentra la máquina en un determinado momento.

Antes de comenzar el seguimiento del estado de una máquina rotativa es conveniente obtener los espectros que se tomarán como referencia para el estudio posterior. Estos espectros servirán como base para determinar el estado inicial de la máquina, y en ellos se deberán identificar las frecuencias características de cada armónico y la causa que las origina. De este modo, las posteriores variaciones que sufran cada una de las componentes de la señal que se esté censando se podrán asociar a la degradación progresiva de algún elemento específico. Dentro de estos nuevos métodos de diagnóstico se encuentran:

♦ ***Análisis espectral del flujo axial***

El flujo axial de dispersión es el flujo magnético considerado como flujo de pérdidas que es inducido por las corrientes circulantes en la máquina. Aparece en la carcasa, los alrededores de la máquina y principalmente a lo largo del eje, razón por la cual recibe su nombre, a través de él se canaliza la mayor cantidad debido a su construcción a base de materiales ferromagnéticos con alta permeabilidad o baja reluctancia con respecto al vacío, tales como el hierro o aleaciones.

El flujo axial de dispersión se presenta en todas las máquinas eléctricas y se produce debido a que las máquinas no pueden ser construidas con una simetría perfecta en los circuitos eléctrico y magnético debido a las tolerancias en la fabricación, anisotropía de los materiales y otros factores que conllevan al desequilibrio entre las corrientes del



rotor y el estator. La existencia de las asimetrías da lugar a la aparición de una diferencia neta entre las corrientes que circulan en una determinada zona de las cabezas de bobina y las que circulan por las cabezas de bobina diametralmente opuestas, este desequilibrio es el causante del flujo axial neto. Por esta misma causa el flujo axial de dispersión presenta diversas componentes armónicas de frecuencia no fundamental que incrementan su magnitud a medida que aumenta la asimetría.

Aunque la trayectoria teórica del flujo axial no está perfectamente definida, se hace razonable que la mayor parte de este se establezca a través del eje por sus características físicas como lo afirman algunos autores [3].

La presencia de un cortocircuito entre espiras del estator hace que el devanado resultante se asemeje al de una bobina de paso acortado donde las componentes armónicas de la fuerza magnetomotriz para este caso se amplifican debido al cambio del paso polar. En otras palabras, el efecto de un cortocircuito entre espiras del bobinado puede incrementar la asimetría y de esta manera modificar el flujo axial. En el caso específico de un cortocircuito entre espiras, ocurre una modificación del circuito eléctrico que ocasiona un cambio subsecuente de la densidad de flujo en el entrehierro de la máquina.

Se puede deducir de estas consideraciones que el efecto general será un cambio en los armónicos temporales observados en el flujo de dispersión. Así una pequeña variación en la densidad del flujo magnético en el entrehierro debido a una falla incipiente, se verá reflejada inmediatamente en el flujo axial de dispersión, lo que lo convierte en un método excepcional para el diagnóstico de este tipo de fallas, lo que no es posible con métodos convencionales. Los armónicos de interés para el cortocircuito entre espiras del estator están dados por [8]:

$$[k \pm n \cdot (1 - S) / p] \cdot f$$

Donde f es la frecuencia fundamental de alimentación, n es un número natural no múltiplo de los polos de la máquina y k es el orden de los armónicos temporales de la fuente.



Una expresión más simple quedará entonces de la forma:

$$k \cdot f \pm n \cdot f_r$$

Donde f_r es la frecuencia de rotación del rotor.

Cuando el motor se encuentra sano, la amplitud de estos armónicos es despreciable o es muy pequeña con respecto a la amplitud de la frecuencia de alimentación. Cuando la amplitud de alguno de estos armónicos aumenta con respecto a un valor predeterminado, se puede pensar seriamente en una falla debido al cortocircuito del devanado del estator.

El flujo axial de dispersión puede ser medido mediante el uso de bobinas exploradoras, éstas son transductores que permiten introducir una señal de tensión proporcional al flujo captado en el correspondiente instrumento electrónico, para analizar luego el contenido de armónicos del flujo axial de dispersión mediante el estudio de la fuerza electromotriz producida por la variación del flujo. Una bobina de flujo axial consiste tan solo en un bobinado de hilo de cobre, que puede tener o no núcleo magnético y que con un número bajo de vueltas (100 aproximadamente) es capaz de obtener suficiente tensión para el análisis en cualquier instrumento digital de medida.

De acuerdo a Cabanas [3], la bobina para la medición puede estar ubicada dentro o fuera del motor, en cualquiera de las dos formas se produce una señal de tensión perfectamente válida para el estudio directo en un analizador dinámico o cualquier otro instrumento de medida.

♦ **Impedancia de secuencia inversa**

Se ha demostrado también, que es posible diagnosticar la presencia de espiras en cortocircuito en el bobinado del estator de un motor de inducción en funcionamiento por medio de un parámetro llamado la impedancia efectiva de secuencia inversa o negativa (Z_{2ef}).

Basado en la teoría de las componentes simétricas [11], este método se constituye en una gran herramienta dentro de los nuevos métodos para el diagnóstico de fallas en los que no se hace necesario un paro de la operación normal de la máquina para detectar fallos dentro de ésta.



♦ ***Par electromagnético***

El par electromagnético es otro de los métodos nuevos y no convencionales de diagnóstico de fallas en las máquinas rotativas que buscan evitar la parada y desmontaje de la máquina.

El par es generado cuando una serie de armónicos en las fuerzas magnetomotrices del rotor y el estator interactúan. Algunas de esas componentes interactúan y generan par motriz mientras las otras solo generan fuerzas pulsantes que producen variaciones en la velocidad.

La metodología para calcular el par en el entrehierro de los voltajes y corrientes instantáneas, se basa en la teoría de vectores espaciales y particularmente en la aplicación de la transformada de Park. Haciendo uso de visualizadores de vectores se observan los vectores de flujos, corrientes y tensiones, y luego se halla el par interno por integración mediante la aplicación directa de la transformada de Park.

1.4 Situación actual

En la empresa Ernesto Che Guevara, actualmente no existe un programa para el diagnóstico de fallos en los motores eléctricos de forma predictiva. Comúnmente la herramienta usada por el personal de mantenimiento para detectar fallas en motores ha sido un megger o un ohmiómetro. Esto se realiza con motor fuera de servicio. Desdichadamente la información brindada es muy general y no precisa la zona de falla del motor en estudio. Es muy fácil un diagnóstico erróneo si se confía solo en los resultados de un megger.

Por otro lado, se realizan inspecciones sólo a motores de media tensión en las que un técnico mide nivel total de vibraciones y ruido en rodamientos; esto sólo le permite detectar la presencia de un problema, pero no puede determinar su naturaleza y por tanto realizar un diagnóstico correcto; esto se debe a que la información recopilada es de forma general y no se pueden precisar los fallos.

Mediante el vibrómetro mide nivel total de vibraciones y no se puede realizar análisis espectral para identificar los problemas, aunque si detectar el estado técnico en



general del motor. Por otro lado, con el estetoscopio puede escuchar sonido en rodamientos, pero se debe tener habilidades debido a que en el ambiente industrial existen muchos ruidos, los cuales pueden interferir y dificultar el trabajo.

La mayoría de las veces lo que ocurre es que el motor de forma imprevista presenta un fallo y se revisa principalmente el aislamiento, pero este solo constituye una zona de falla, por lo que el diagnóstico es limitado. En caso que se detecte un problema a tiempo, el motor se manda a reparar sin conocer con precisión el problema y la causa que lo generaron, de lo contrario, finalmente ocurre la avería catastrófica, con la consiguiente afectación a la producción e incremento de los costos de mantenimiento.

En la empresa existe implantado un programa de mantenimiento predictivo para algunos equipos que son fundamentales en el proceso productivo y se lleva a cabo por compañeros que realizan análisis de vibraciones y pueden para los motores de estos equipos, identificar con el uso de un colector-analizador de vibraciones, algunos problemas de tipos mecánicos, tales como desalineación, desbalance y problemas en rodamientos, pero el diagnóstico se ve sumamente limitado para identificar problemas eléctricos con el uso del análisis de vibraciones, principalmente se puede analizar el comportamiento mecánico, por lo que se necesita el empleo de otras técnicas predictivas para analizar el comportamiento eléctrico, las cuales no están implementadas en la fábrica.

En resumen, se puede plantear que en nuestra empresa, respecto a los motores eléctricos, sólo se utiliza y en unos pocos, el análisis de vibraciones para diagnosticar problemas principalmente de naturaleza mecánica, siendo esta una técnica predictiva de carácter general que permite identificar algunos modos típicos de fallo, pero no alcanza a detectar otros problemas de naturaleza eléctrica, se requieren de otras herramientas predictivas específicas.

A nivel territorial y nacional la práctica es la misma, es decir el uso de las herramientas comunes como el medidor de aislamiento (megger) y un ohmímetro para tratar de diagnosticar fallas en motores eléctricos y en el caso de empresas que tienen



implantado un programa de mantenimiento predictivo el uso del análisis de vibraciones. Realmente ni vibraciones, ni un ohmiómetro, ni un megger logran revisar las zonas de falla de un motor, por lo tanto, la tecnología predictiva que se está aplicando en las plantas es insuficiente para evaluar los componentes que pueden causar la falla.

1.5 Trabajos precedentes

En los últimos años se han propuesto e implementado muy variadas alternativas para la detección y diagnóstico de fallos en máquinas de inducción. Algunas de estas nuevas alternativas son atractivas debido a que se caracterizan por su carácter no invasivo y a su capacidad para detectar fallos mientras una máquina funciona en condiciones normales y a que no necesitan sensores que deban montarse sobre motor.

El análisis de vibraciones puede ser usado para el diagnóstico de problemas mecánicos. Desde que aparecieron los primeros instrumentos musicales, en especial los de cuerda, la gente ya mostraba un interés por el estudio del fenómeno de las vibraciones, por ejemplo, Galileo encontró la relación existente entre la longitud de cuerda de un péndulo y su frecuencia de oscilación, además encontró la relación entre la tensión, longitud y frecuencia de vibración de las cuerdas [7].

A través de la historia, grandes matemáticos elaboraron importantes aportaciones que hicieron del fenómeno de las vibraciones toda una ciencia, siendo hoy en día una de las más estudiadas y aplicadas en la industria. Se puede mencionar entre otros, Taylor, Vernoulli, D' Alembert, Lagrange, Fourier, etc. La ley de Hooke en 1676 sobre la elasticidad, Coulomb dedujo la teoría y la experimentación de oscilaciones torsionales, Rayleigh con su método de energías, etc. Fueron grandes físicos que estructuraron las bases de las vibraciones como ciencia [7].

Para diagnosticar problemas eléctricos en las últimas décadas se han desarrollado variadas técnicas que involucran el análisis de corriente, varios de los trabajos encontrados se refieren a estas técnicas.



En el trabajo realizado por C. Verucchi [2003], y otros autores presentan un sistema de diagnóstico que permite detectar, discriminar y ponderar la gravedad de algunas de las fallas más comunes en los motores de inducción. El sistema de diagnóstico se basa en el seguimiento de las corrientes del estator, el cual puede funcionar en modo on-line y no requiere de la instalación de sensores dentro o sobre el motor. La desventaja está en que sólo se podrían seleccionar algunos motores y no se lograría la masividad necesaria para el mantenimiento predictivo. Tampoco involucra el empleo del análisis de vibraciones.

En otro trabajo realizado por este autor y otros presenta el desarrollo de un sistema de detección automática de fallas en barras o anillos de cortocircuito en los rotores de las máquinas de inducción. El sistema propone una detección “on-line” de las fallas a partir del censado de la corriente de una fase del estator. Una interfaz gráfica permite observar el estado del rotor y ponderar la gravedad de las fallas por medio de índices apropiados. El sistema propuesto se aplica sobre un banco de pruebas experimental que permite evaluar su capacidad de diagnóstico. Este sistema es efectivo a escala de laboratorio y para el monitoreo de algunos motores importantes, no así a la hora de establecer un programa de mantenimiento predictivo, donde los motores se examinan in situ y constituyen una gran cantidad. No involucra el análisis de vibraciones.

En su trabajo A. Menacer junto a otros autores publicado en el 2004, presenta la evolución en el tiempo del efecto de barras rotas desde la falla incipiente creada en las varias características de las máquinas de inducción tales como torque, velocidad y corriente. Esta es simulada mientras la resistencia de las barras del rotor es variada linealmente contra tiempo desde su valor normal hasta la situación de barras rotas (parcial a barras rotas total). De esta forma se puede observar el impacto de la falla incipiente en los diferentes valores de las características de la máquina (torque, velocidad y corriente). La dificultad está en que es difícil poder medir estos parámetros en el caso de establecer un programa de mantenimiento predictivo, pero demuestra la efectividad del análisis de corriente en el diagnóstico.



En el artículo presentado por C. Caballero [2005], muestra una aplicación de la técnica de análisis espectral de corrientes del estator (MCSA) a la detección de daños en rodamientos y barras del rotor de motores eléctricos de inducción. Se configuró un sistema de adquisición de datos y se desarrolló un programa que localiza las componentes espectrales asociadas a un posible defecto y estima la severidad del daño mediante un software de instrumentación virtual. El sistema demostró eficacia para detectar daños en barras, sin embargo, encontraron limitaciones de sensibilidad en el diagnóstico de daños en rodamientos. En este trabajo se muestra la Tabla de Criterio de diagnóstico de daños en barras del rotor (Cabanias et al, 1998) la cual resulta útil como criterio de evaluación de la severidad de los defectos en el motor.

En su trabajo S. Giaccone, G. Bossio y G. García estudian un modelo que describe al motor de inducción con falla a neutro en las bobinas de una fase. Para evaluar los efectos de esta falla se analiza la traza del vector de corrientes en su espectro vectorial. Los resultados de simulación y experimentales mostraron que estas fallas en el estator producen una modificación del vector corrientes debido a la aparición de una componente de secuencia negativa de frecuencia nominal. Esta componente puede utilizarse en estrategias de diagnóstico. Este trabajo sólo se limita a un tipo de falla y además no se combina con el análisis de vibraciones.

En el trabajo presentado en el XIV Congreso Brasileño de Automática por G. Bossio y otros autores, analiza el efecto de distintas fallas en el rotor sobre una estrategia de estimación de posición en accionamientos con motores de inducción. Las fallas analizadas son barras o anillos rotos y excentricidad estática o dinámica del entrehierro. La estrategia analizada se basa en el efecto que producen las variaciones de inductancia, entre los bobinados del estator y las barras del rotor, sobre la tensión de secuencia cero del motor, cuando éste es excitado mediante una secuencia de pulsos preestablecida, aplicada por el inversor del accionamiento. Es necesario tener un conocimiento profundo del tema.



En su disertación doctoral M. Dumitru [2006], representa un detallado análisis del comportamiento del flujo magnético, el cual supone potencial información, útil sobre fallas en los motores de inducción. El estudio presenta un intento para implementar en simulaciones numéricas una falla de aislamiento localizada en la laminación del estator y sugerir un indicador de falla eléctrica que debe ser confidentemente usado para detectar tal anomalía. Este trabajo sólo se limita a una de las fallas que se presentan en los motores, además se necesitan conocimientos avanzados y no se relaciona con el análisis de vibraciones.

A. Piñol, J. A. Ortega y J. L. Romeral [2006], presentan un trabajo donde se hace una valoración de los diferentes tipos de mantenimientos, así como el diagnóstico por análisis de vibraciones y el uso del análisis de la señal de corriente del motor. Se hace una exposición de estas técnicas dando una visión de la tendencia actual.

En el artículo de M. Castelli [2006] y otros autores presenta el proyecto de desarrollo de un nuevo equipo para la realización de mantenimiento predictivo en motores rotativos asíncronos de gran porte. Se describen los estudios analíticos y la metodología de trabajo empleada para la detección de distintos fallos en los motores. Finalmente se muestran ensayos preliminares que se realizaron en motores industriales con el fin de validar la propuesta presentada. En este trabajo se establece las frecuencias de diagnósticos de defectos, así como una valiosa explicación de las mismas, siendo muy útil en el entendimiento de la técnica MCSA.

En el trabajo desarrollado por R. Supangat [200] junto a otros autores, investiga la detección de fallas en el rotor de máquinas de inducción por análisis de la corriente de arranque. En este caso se realiza la extracción de la envolvente de corriente para eliminar la fuerte componente fundamental, la cual eclipsa las diferentes características entre un motor sano y uno con barras del rotor rotas. El inconveniente radica en que es necesario poner fuera de operación al motor, no siendo viable en un programa de mantenimiento predictivo.



C. J. Verucchi y G. G. Acosta realizaron un trabajo cuyo propósito consistió en revisar las principales alternativas en el campo del diagnóstico de fallos en máquinas de inducción y en efectuar una comparación de las prestaciones de cada una de ellas en función de la información que requieren para el diagnóstico, el número e importancia de los fallos que pueden detectar, la rapidez con la que son capaces de anticipar un fallo y el grado de certeza en el diagnóstico final. Sólo que estas técnicas se expresan aisladas y no se combinan para obtener un diagnóstico general del motor de inducción

VALORACIÓN GENERAL

De los trabajos precedentes expuestos anteriormente, puede afirmarse que en los últimos años se han propuesto e implementado muy variadas alternativas para la detección y diagnóstico de fallos en máquinas de inducción. Estas nuevas alternativas son atractivas debido a que se caracterizan por su carácter no invasivo y a su capacidad para detectar fallos mientras una máquina funciona en condiciones normales y a que no necesitan sensores que deban montarse sobre motor. Estas características distinguen a estas nuevas técnicas de las tradicionales, que en su mayoría requieren que la máquina analizada se encuentre fuera de servicio para poder efectuar el diagnóstico.

Como aspecto negativo tienen que son técnicas utilizadas aisladamente para la detección de fallas eléctricas y que en ningún caso se relacionan con el análisis de vibraciones, lo cual haría más completo el diagnóstico de una máquina de inducción. En otros casos sólo pueden ser utilizadas a nivel de laboratorio o en selección de unas pocas máquinas, dificultándose su aplicación en pasividad e in situ, no siendo útiles para la aplicación de un mantenimiento predictivo.



I.6 FUNDAMENTOS METODOLÓGICO DEL PROYECTO.

Tipo de proyecto

Este es un proyecto de investigación que consiste en la obtención de una metodología para el diagnóstico vibro-eléctrico de motores de inducción, porque actualmente existen insuficiencias en este campo de nuestra fábrica y a nivel de país, al contar con dicha metodología se puede establecer un programa de mantenimiento predictivo de averías en dichos motores.

Tipo de estudio realizado

El estudio realizado es descriptivo, analítico y experimental.

Período y lugar donde se desarrolla la investigación

El período de tiempo es de un año a razón de una semana por mes. La investigación se realiza en la fábrica niquelífera Ernesto Che Guevara, municipio Moa, provincia Holguín, Cuba.

Universo y Muestra

El universo de estudio son los motores de inducción del tipo de jaula de ardilla. Se tomaron motores con problemas reales como muestra para la realización de los experimentos y aplicación práctica de la metodología propuesta.

Métodos

En este proyecto se utilizará el método Hipotético-Deductivo, la hipótesis de este será el punto de partida para la deducción de una metodología que nos permita diagnosticar electromecánicamente a los motores antes mencionados, comprobándose experimentalmente.

Selección de variables

Las variables seleccionadas son niveles de vibraciones y análisis espectral de corriente, de los cuales se obtendrá el estado técnico eléctrico-mecánico de los motores.



Procedimientos

Principalmente la búsqueda profunda de informaciones y todo lo relacionado con el tema. Uso principalmente de Internet, solicitud a autores de trabajos extranjeros y a profesores de universidades, luego se realizó el procesamiento y compilación de lo obtenido.

Métodos de recolección de la información

La recolección de la información fue principalmente mediante vía Internet, este es un tema de reciente desarrollo y no existen libros para su estudio. La mayoría de los trabajos se encuentran en la gran red mundial, no así en las bibliotecas.

Toma y análisis de los datos de medición

Para la realización y toma de datos se cuenta con un equipo de muy alta calidad de la firma reconocida alemana PRUFTECHNIK Condition Monitoring, con el modelo de equipo VIBXPERT® con los datos técnicos siguientes:

Canales de medición:

- Dos canales análogos (A & B), seleccionables:
 - Voltaje (AC/DC, ± 30 V máx.).
 - Corriente (AC/DC, ± 30 mA máx.).

Rango de medición / exactitud:

- RPM 10...200 000 rpm / $\pm 1\%$ / ± 1 rpm.
- Temperatura -50...+1000°C (NiCrNi) / $\pm 1\%$ / $\pm 1^\circ\text{C}$.
- Desplazamiento* 6000 μm (p-p) / $\pm 1\%$.
- Velocidad* 6000 mm/s (p-p) / $\pm 1\%$.
- Aceleración* 6000 m/s^2 (p-p) / $\pm 1\%$.

FFT:

- Fmin 0Hz freq. máx., seleccionable.
- Fmax 1Hz 40 kHz, seleccionable.
- Líneas 100 102400.



Memoria:

- RAM, interno 64 MB.

Pantalla:

- LCD, iluminada, 480x320 pixels (1/2 VGA).

Clase de protección:

- IP65, segura contra polvo y agua.

Dimensiones:

- 180 x 160 x 50 mm.

Peso:

- 1.2 Kg.

* Transductor Current LineDrive ($1\mu\text{A/ms}^{-2}$) y sensor con salida de voltaje (100mV/g);
referencia: 159.15 Hz

También se cuenta con el software OMNITREND® para el trabajo en el computador. OMNITREND® administra los datos de la máquina, programa las tareas de medición y rutas, y archiva los resultados en una base de datos (MS Access, Oracle*, MS SQL*).

Funciones de fácil manejo y comprensión están disponibles para evaluación y documentación: verificación de alarmas, pronóstico de tendencias, multipantallas, análisis de bandas, diagramas de cascada, marcadores de frecuencias y diferentes tipos de cursores.

Conclusiones del capítulo:

- Se vieron las diferentes técnicas y métodos tradicionales aplicados al diagnóstico de motores de inducción.
- Se expusieron los nuevos métodos de diagnósticos que pudieran emplearse.
- Se realizó panorámica de la situación actual en la empresa Che Guevara.
- Se realizó valoración bibliográfica de los trabajos precedentes.
- Se establecieron los fundamentos metodológicos del proyecto.



CAPITULO II. *ESTRATEGIAS Y ANÁLISIS DE DEFECTOS EN MOTORES DE INDUCCIÓN*



II.1 Introducción

El aumento de competitividad a nivel internacional, y las exigencias de calidad, han motivado que las empresas destinen cada vez mayores recursos, tanto humanos como materiales a sus planes de mantenimiento en equipos e instalaciones, donde los motores de inducción son pieza clave.

Las estrategias a seguir a la hora de implementar un plan de mantenimiento se pueden clasificar en tres grandes grupos:

a) Mantenimiento correctivo. En esta estrategia la reparación solamente se lleva a cabo cuando aparecen averías que provocan la interrupción de la producción. Es un método fácil de implementar, pero provoca grandes costos por el paro de producción y conlleva riesgos para el personal de planta.

Adicionalmente las reparaciones suelen ser de baja fiabilidad debido a la premura de tiempo en el momento de realizarlas.

b) Mantenimiento preventivo. Consiste en realizar paradas planificadas de la producción en las cuales los elementos más críticos y susceptibles a averiarse, son sustituidos por otros nuevos. Para determinar los periodos de tiempo en que se han de realizar las paradas se utilizan criterios estadísticos. Esta estrategia conlleva por un lado un aumento en la calidad y seguridad de la producción, pero por otro no aprovecha en su totalidad la vida útil de los elementos, puesto que estos son sustituidos cuando todavía se encuentran en buen estado.

c) Mantenimiento predictivo. En este caso se sigue un seguimiento continuo de algunas variables que determinan el estado del sistema, y se comparan con patrones preestablecidos con el fin de determinar el instante óptimo en el que se ha de realizar la reparación. En otras palabras, se supervisa la máquina y se repara justo en el momento en que empieza a fallar.

Esta última estrategia, es la de más difícil implementación porque necesita de una fuerte inversión inicial en equipos de medida, y formación de técnicos. No obstante es la que proporciona mejores resultados a la industria, puesto que se maximiza el tiempo



de vida de los equipos, garantizando la máxima calidad y seguridad del proceso productivo.

Como ventaja adicional, del análisis de las medidas realizadas se puede inferir cual fue la causa de la avería. Esto permite no solo sustituir la pieza defectuosa, sino, que dentro de lo posible, se pueden modificar las condiciones de trabajo de la máquina para evitar la aparición de nuevas averías.

II.2 Mantenimiento predictivo en motores de inducción

Definición de mantenimiento predictivo:

El mantenimiento predictivo es una técnica para pronosticar el punto futuro de falla de un componente de una maquina, de tal forma que dicho componente pueda reemplazarse, con base en un plan, justo antes de que falle. Así, el tiempo muerto del equipo se minimiza y el tiempo de vida del componente se maximiza.

Una de las decisiones más importantes que se ha de tomar en el momento de implementar un sistema de mantenimiento predictivo de motores de inducción, es cuál o cuáles serán las variables que se monitorizarán y que permitirán realizar el diagnóstico de la máquina.

En un principio, serían muchas las variables que se podrían tomar en consideración a la hora de poder emitir un diagnóstico, pero han de cumplir el requisito de poder monitorizarlas con la máquina en funcionamiento y realizando medidas no invasivas. Estas restricciones reducen el conjunto de posibilidades al análisis de las vibraciones mecánicas o al análisis de las corrientes de alimentación.

II.3 Acerca del diagnóstico por análisis de vibraciones

Este es uno de los métodos clásicos de diagnóstico utilizados en las máquinas. En condiciones ideales, en una máquina rotativa no deberían existir ningún tipo de vibraciones; pero las imperfecciones en la construcción de las máquinas, los procesos en los que están implicados y la existencia de averías provocan un incremento global de las mismas.



El análisis frecuencial de vibración se ha mostrado eficaz durante décadas para el diagnóstico de averías de tipos mecánicos: desequilibrios, desalineaciones, degradación de los cojinetes, etc.

No obstante es difícil a partir de un análisis de vibraciones el poder determinar la presencia de averías de tipo eléctrico como la rotura de barras del rotor, o el cortocircuito de espiras de las bobinas del estator.

La importancia de las Vibraciones Mecánicas llega al Mantenimiento Industrial de la mano del Mantenimiento Preventivo y Predictivo, con el interés de alerta que significa un elemento vibrante en una maquina y la necesaria prevención de las fallas que traen las vibraciones a medio plazo.

El interés principal para el mantenimiento es la identificación de las amplitudes predominantes de las vibraciones detectadas en el elemento o máquina, la determinación de sus causas y la corrección del problema que ellas representan. Las consecuencias de las vibraciones mecánicas son el aumento de los esfuerzos y tensiones, pérdidas de energía, desgaste de materiales, y las más temidas: daños por fatiga de los materiales, además de ruidos molestos en el ambiente laboral.

Parámetros de las vibraciones:

- Frecuencia: Es el tiempo necesario para completar un ciclo vibratorio. En los estudios se usan los ciclos por minuto (CPM) o Hertz (Hz).
- Desplazamiento: Es la distancia total que describe el elemento vibrante, desde un extremo al otro de su movimiento.
- Velocidad y Aceleración: Como valor relacional de los anteriores.
- Dirección: Las vibraciones pueden producirse en tres direcciones lineales y tres rotacionales.

Tipos de vibraciones:

Vibración libre: causada por un sistema vibra debido a una excitación instantánea.

Vibración forzada: causada por un sistema que vibra debido a una excitación constante las causas de las vibraciones mecánicas. Las razones más habituales por las que una



máquina o elemento de la misma puede llegar a vibrar son: desequilibrado, falta de alineamiento, excentricidad, falla de rodamientos y cojinetes, problemas de engranajes y correas de transmisión (holguras, falta de lubricación, roces, etc.)

Historia, estudio e importancia

Desde que aparecieron los primeros instrumentos musicales, en especial los de cuerda, las personas mostraban interés por el estudio del fenómeno de las vibraciones, por ejemplo, Galileo encontró la relación existente entre la longitud de cuerda de un péndulo y su frecuencia de oscilación, además encontró la relación entre la tensión, longitud y frecuencia de vibración de las cuerdas [12].

A través de la historia, grandes matemáticos elaboraron importantes aportaciones que hicieron del fenómeno de las vibraciones toda una ciencia, siendo hoy en día una de las más estudiadas y aplicadas en la industria. Se puede mencionar entre otros, Taylor, Vernoulli, D' Alembert, Lagrange, Fourier, etc. La ley de Hooke en 1676 sobre la elasticidad, Coulomb dedujo la teoría y la experimentación de oscilaciones torsionales, Rayleigh con su método de energías, etc. Fueron grandes físicos que estructuraron las bases de las vibraciones como ciencia.

TRANSFORMADA DE FOURIER:

Las vibraciones en el dominio del tiempo son señales directas de la máquina. En estas señales se encuentra plasmada toda la información acerca del comportamiento de cada componente de la máquina. Pero hay un problema a la hora de realizar un diagnóstico: estas señales están cargadas de mucha información en forma muy compleja, la cual comprende las señales características de cada componente de la máquina, por lo cual prácticamente queda imposible distinguir a simple vista sus comportamientos característicos [13].

Existen otras formas para realizar un estudio de vibraciones, entre las cuales se encuentra mirar esta señal en el dominio de la frecuencia. Esta es la gráfica de Amplitud vs. Frecuencia y es conocida con el nombre de espectro. Esta es la mejor herramienta que se tiene actualmente para el análisis de maquinaria.



Fue precisamente el matemático francés Jean Baptiste Fourier (1768 – 1830) quien encontró la forma de representar una señal compleja en el dominio del tiempo por medio de series de curvas sinusoidales con valores de amplitud y frecuencia específicos.

Entonces lo que hace un analizador de espectros que trabaja con la Transformada Rápida de Fourier (FFT) es capturar una señal desde una máquina, luego calcula todas las series de señales sinusoidales que contiene la señal compleja y por último las muestra en forma individual en el eje X de la frecuencia. En la siguiente ilustración puede notarse claramente la señal compleja capturada desde una máquina. A dicha señal se le calculan todas las series de señales sinusoidales en el dominio del tiempo y por último se muestra cada una en el dominio de la frecuencia.

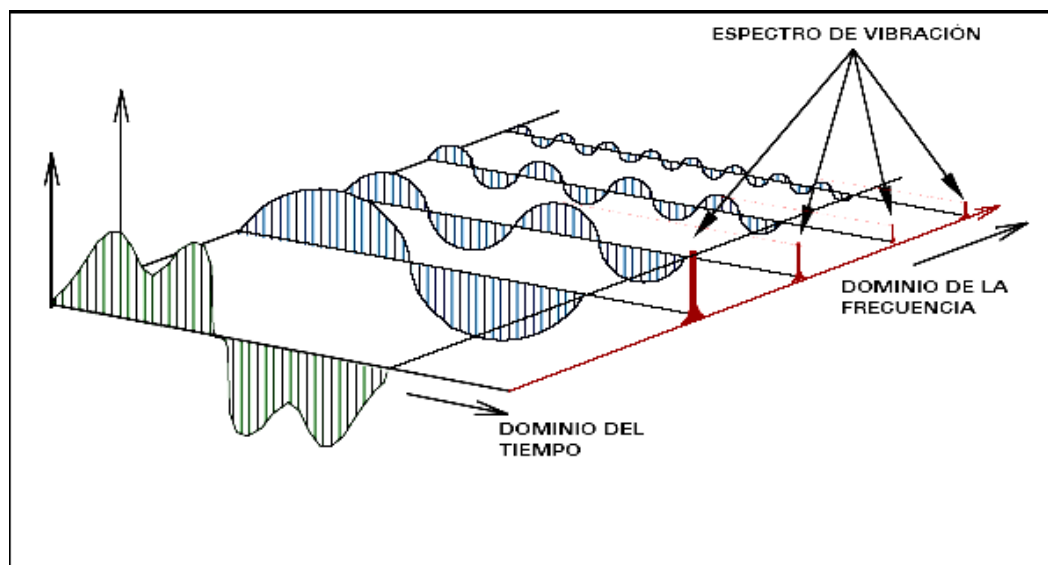


Figura 2: Señales capturadas en una máquina y su descomposición [13].

La figura siguiente muestra una señal en el dominio del tiempo y su correspondiente en el dominio de la frecuencia.

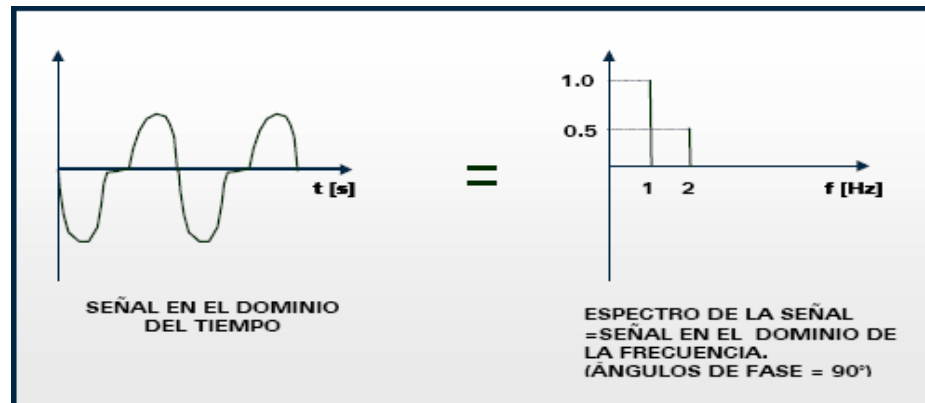


FIGURA 8

Figura 3: Señal dominio tiempo y su espectro correspondiente [13].

ANÁLISIS ESPECTRAL:

Cuando se mide una máquina, se genera una información muy valiosa que es necesario analizar. El éxito de este análisis depende de la correcta interpretación que se le de a los espectros capturados con respecto a las condiciones de operación en que se encuentra la máquina. A continuación se muestra un esquema de cómo sería la captura de la información desde una máquina para luego ser analizada.

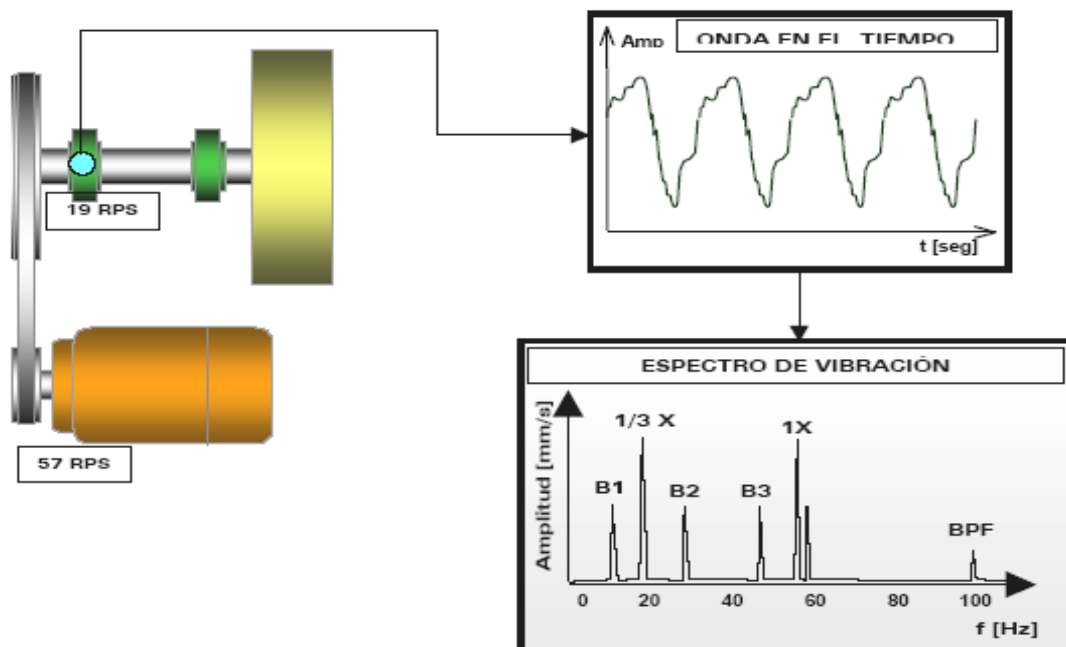


Figura 4: Procesamiento y análisis de información desde la máquina.



DESPLAZAMIENTO, VELOCIDAD Y ACELERACIÓN DE VIBRACIÓN

Existen varias variables para medir la amplitud de vibración de un espectro. Para vibraciones mecánicas lo más común es medirlas en unidades de desplazamiento, velocidad y aceleración. Cada una presenta ventajas respecto de las otras.

La medida en desplazamiento es importante para reconocer patrones que están a muy baja frecuencia. Esta es una medida especial para hallar anomalías en chumaceras de aceite, muy utilizadas en turbo-maquinarias.

La medida en velocidad permite reconocer la mayoría de los patrones de fallas primarias y de otros componentes cuando están en un estado evidente, como por ejemplo desbalance, desalineación, holgura mecánica, fricciones abrasivas, resonancias, pulsaciones, engranajes de pocos dientes, sistema de poleas, aspas de bombas y ventiladores. Esta variable de velocidad es importante para resaltar picos de bajas y medias frecuencias.

La medida en aceleración permite reconocer patrones asociados a contactos metal-metal y fricciones abrasivas, problemas en engranajes, cavitación, entre otros. Esta variable resalta picos de vibración de medias y altas frecuencias, y es muy utilizada para la detección prematura de fallas en chumaceras y rodamientos, y otros componentes como engranajes.

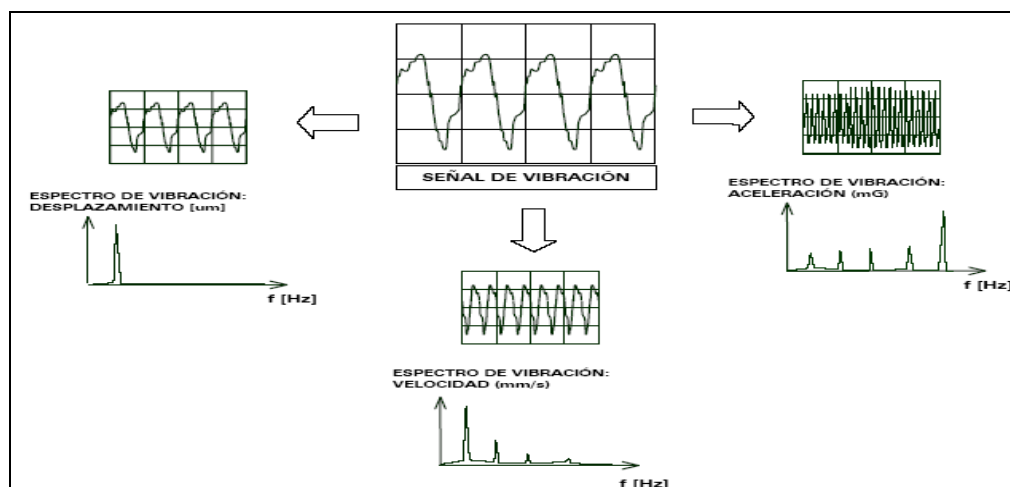


Figura 5: Señal vibración vista en las tres variables (desplazamiento, velocidad y aceleración).

ALARMAS DE NIVEL Y TENDENCIA

Antes de entrar a realizar un diagnóstico es necesario observar los niveles de vibración que presenta cada uno de los puntos de la máquina. Muchas veces los espectros de vibración pueden presentar picos especiales, pero esto no significa que haya una característica de falla, ya que la máquina puede estar operando en condiciones normales establecidos por la norma, figura 6. El problema se presenta cuando estos picos comienzan a aumentar su nivel e incrementar el nivel total del punto.

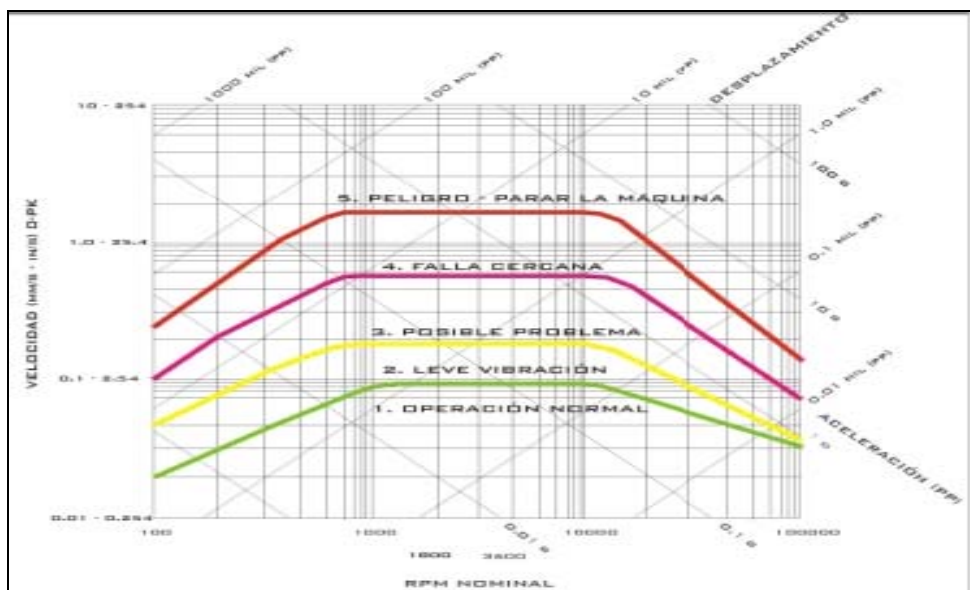


Figura 6: Niveles de alarmas y tendencia.

Existen algunas normas internacionales que proponen unos estándares generales para varios tipos de máquinas y niveles de alarma. Estos niveles pueden aplicarse a una gran cantidad de máquinas, pero hay excepciones que exigen estudiar otras herramientas para poder llegar a una conclusión del estado de máquina.

Existe una gráfica logarítmica que encarna valores de aceleración, velocidad y desplazamiento frente a una frecuencia específica. Dicha gráfica contiene unos niveles generalizados de alarma.

Para aplicarlos a diferentes máquinas, se hace necesario revisar varias características presentadas en ellas, como son su tamaño y su cimentación y de acuerdo a ello, se



escoge un factor de servicio, en la tabla mostrada mas adelante, se presentan unos valores tentativos de los factores de servicio de estas máquinas.

Un ejemplo de norma de rangos de severidad de vibración es la ISO 2372 la cual ejemplifica límites de y los factores de servicio para cuatro tipos de máquina. Como ya se dijo anteriormente, estos límites pueden ser prácticos para muchas máquinas básicas de proceso, pero es importante considerar la individualidad inherente a cada equipo lo que hace necesario la utilización de otras herramientas tales como el seguimiento de niveles de tendencia y el respectivo historial de mantenimiento.

El valor de severidad de la vibración asociada a un rango de clasificación en particular, depende del tamaño y masa del cuerpo vibrante, las características del montaje del sistema, la salida y el uso que se le da a la máquina, tabla 1. De esta forma es necesario tomar cuenta de varios propósitos y circunstancias concernientes a los diferentes rangos [13].

Tabla 1: Rangos de severidad de vibración para máquinas pequeñas, de tamaño mediano, grandes máquinas y turbomáquinas (clase I, II, III, IV respectivamente). Norma ISO-2372.

RANGO DE SEVERIDAD DE VIBRACION		CLASES DE MÁQUINAS			
VELOCIDAD RMS (mm/s)	VELOCIDAD 0-PK (mm/s)	CLASE I	CLASE II	CLASE III	CLASE IV
0.28	0.3960	A	A	A	A
0.45	0.6364				
0.71	1.0041				
1.12	1.5839	B	B	B	B
1.8	2.5456				
2.8	3.9598	C	C	C	C
4.5	6.3640				
7.1	10.0409	D	D	D	D
11.2	15.8392				
18	25.4558				
28	39.5980				
45	63.6396				
71	100.4092				
FSM para las máquinas		1.57020	1	0.62608	0.39625
FSN para los niveles (1/FSM)		0.63686	1	1.59725	2.52364

FSM: factor de servicio para las clases de máquinas.

FSN: factor de servicio para los niveles.



Lo anterior es una de las clasificaciones recomendadas para la escogencia del factor de servicio de una máquina. Pero como se ha dicho no está dada para todas las aplicaciones y por lo tanto puede sustituirse de acuerdo a situaciones particulares que se presenten.

II.3.1 Causas más frecuentes de vibraciones en motores de inducción

Existen espectros y comportamientos típicos mediante el cual se puede diagnosticar fallos tanto en motores como en otros equipos, a continuación una muestra de los principales problemas y sus espectros típicos, tomados de [15,16].

Desbalance

A diferencia de otros problemas, el desbalance causa una senoide pura y por lo tanto genera un pico de vibración radial a $1x$ rpm. La diferencia de fase entre la dirección horizontal y vertical de 90° .

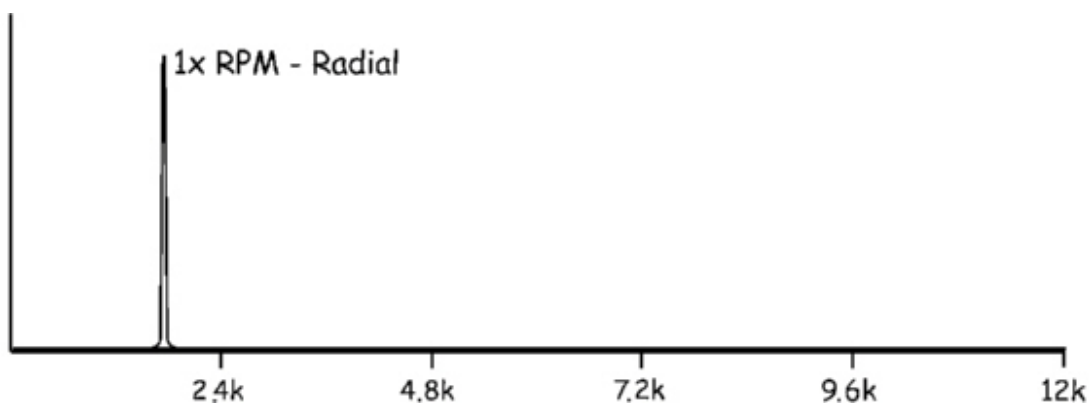


Figura 7 – Espectro radial típico generado por el desbalance.

Desalineamiento angular

Definición: El centro de línea de los eje se interceptan, pero no paralelamente.

Síntomas:

- Alta vibración axial @ $1x$ rpm, posible armónicas a $2x$ y $3x$.
- Componente $2x$ rpm axial puede ser tan o más alto que el componente $1x$.



- Vibración radial, probablemente con amplitudes más baja que la axial a 1x, 2x y 3x; con desfase de 180 grados a través del acople.
- La vibración radial dependerá de donde el centro de línea del eje intercepte el del acople.

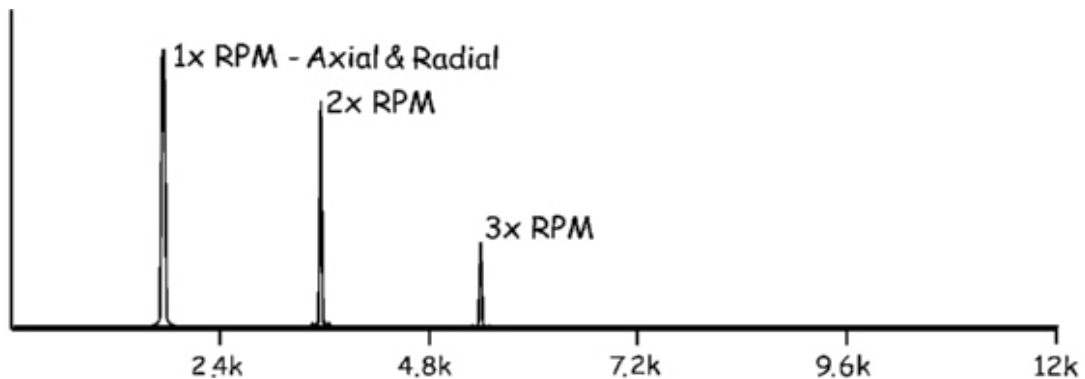


Figura 8 - Espectro típico generado por el desalineamiento angular.

Estos síntomas también indican problemas en el acople. Para corregirlo, el conjunto motor-rotor deben alinearse. Debe emplearse un equipo de alineación adecuado.

Desalineamiento Paralelo

Definición: Los centros de líneas de los ejes son paralelos, pero no son colineales.

Síntomas:

- Alta vibración axial @ 1x rpm, posible armónicas a 2x y 3x.
- Componente 2x rpm radial puede ser tan o más alto que el componente 1x.
- Vibración axial, probablemente con amplitudes más baja que la radial a 1x, 2x y 3x; con desfase de 180 grados a través del acople. Cuando aumenta la severidad, genera picos en armónicos superiores (4X, 8X).

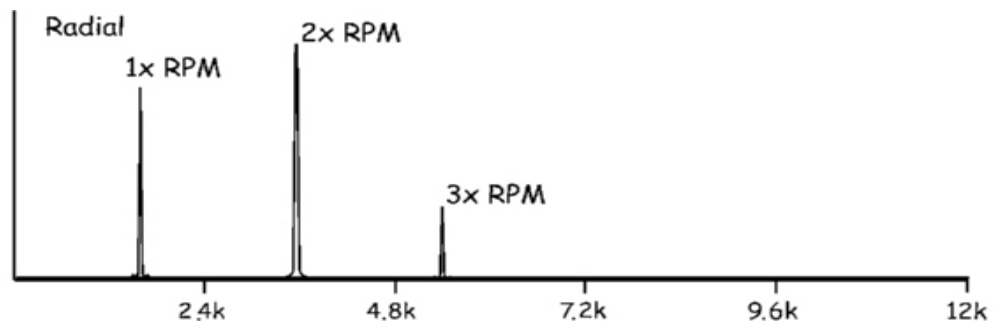


Figura 9 - Espectro típico generado por el desalineamiento paralelo.

Se debe alinear el conjunto para corregir el daño. Debe emplearse un método y equipo de alineación adecuado.

Solturas en rodamientos

Síntomas:

- Alta vibración radial en armónicas a 1x.
- Armónicas pueden expandirse a través de todo el espectro en caso de flojedad severa y pueden además generar medias armónicas en caso extremo (1.5, 2.5, 3.5, etc.).

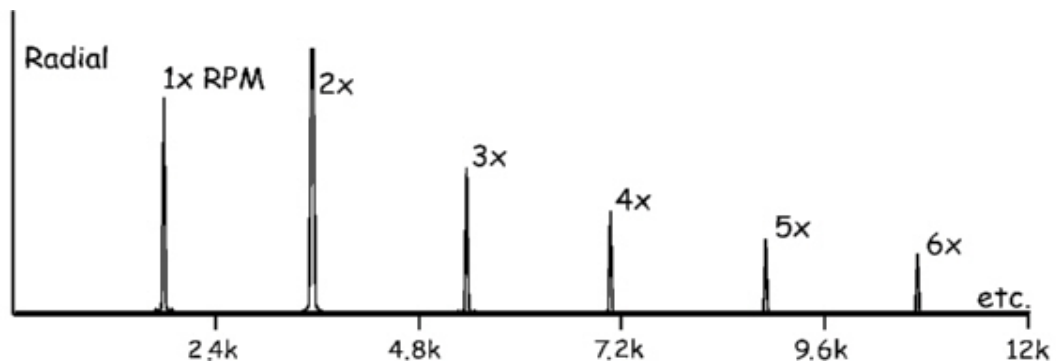


Figura 10 - Espectro típico radial generado por solturas en los rodamientos.

Distorsión del Housing (Pedestal blando)

Síntomas:

- Alta vibración axial @ 1x y posibilidad a 2x rpm.



- 2x Línea frecuencia debido a la variación del entre hierro, especialmente en la radial.

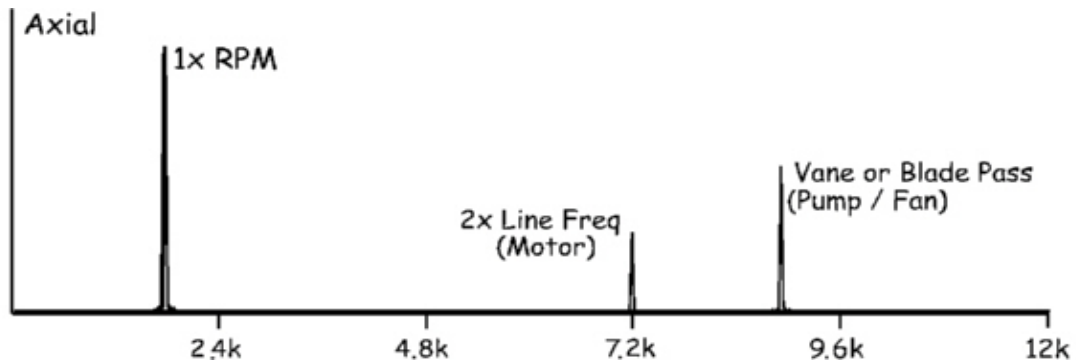


Figura 11 - Espectro típico axial generado por distorsión en el housing

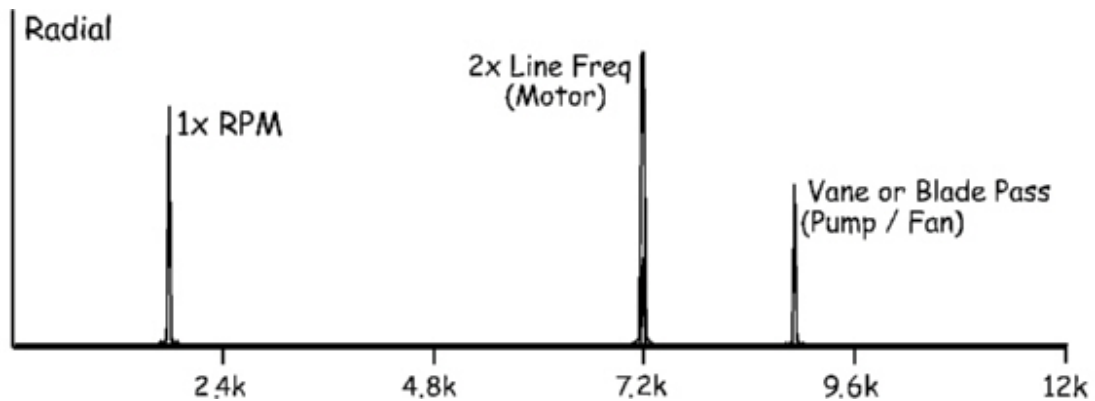


Figura 12 - Espectro típico radial por distorsión del housing

Rozamientos

Síntomas:

- La forma de diagnosticarlo más fácil es en el dominio del tiempo, la señal producida es truncada.
- Las lecturas deberán ser tomadas en varias posiciones radiales.
- Las FFT pueden producir numerosas armónicas de rpm (parecido al de rodamientos sueltos) pero también sub-armónicas a $1/2 \times \text{RPM}$ en caso severo debido a la forma de la onda (resultados no predecibles).
- Armónica de más alta amplitud pueden estar cercana a la resonancia de un componente.

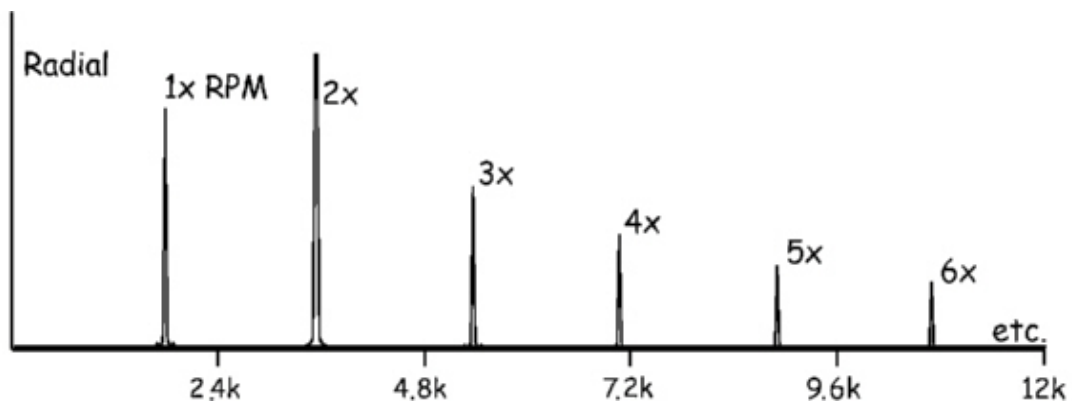


Figura 13 - Posible espectro resultado de un roce. Gráfico no predecible debido a la forma de la onda; el gráfico en dominio del tiempo es esencial.

Problemas en rodamientos de elementos rodantes

Debido a que los rodamientos constituyen el mayor por ciento de fallos en motores eléctricos, aproximadamente el 50%, se hará una explicación mas detallada a fin de poner a disposición una amplia información para su diagnóstico.

La valoración de la condición de los rodamientos es posiblemente el trabajo más importante que tiene un analista de vibración. Desafortunadamente, los síntomas de vibración generados por rodamientos malos pueden variar grandemente. Sin embargo, los rodamientos generalmente experimentan unas series de síntomas previsibles según se deterioran. Considerando la importancia de la tarea y realzar la oportunidad del analista de detectar un rodamiento malo, es importante usar todas las herramientas a su disposición.

Estas incluyen:

- Espectro de Velocidad, o preferiblemente, de aceleración que cubra el rango de frecuencia entre 30,000 y 120,000 cpm.
- Espectro envolvente tales como gSE, HFD, etc. Estos espectros son sensibles a las energías de impacto generados por los defectos de los rodamientos.
- En el dominio del tiempo se mostraran los impactos mejor que el espectro, especialmente en motores de baja velocidad.



Síntomas en la etapa más temprana de falla de los rodamientos

- Aún en la etapa más incipiente de un defecto, este genera fricción o impactos relacionado con vibración de alta frecuencia.
- Debido a la ocurrencia de estos impactos, los defectos se muestran más tempranamente en la envolvente de espectro (Fig. 14).
- Las señales envolventes incluyen gSE (IRD), HFD (SKF) , ESP (DI), Peakvue (CSI), Shock Pulse, y más.
- En etapas tempranas, el análisis será mejor en el gráfico de la onda de tiempo que en cualquiera de los espectros de velocidad o aceleración.

Las figuras 14 y 15 muestran dos gráficos que podrían ser considerados típicos mostrando síntomas de un defecto en el rodamiento en etapa temprana.

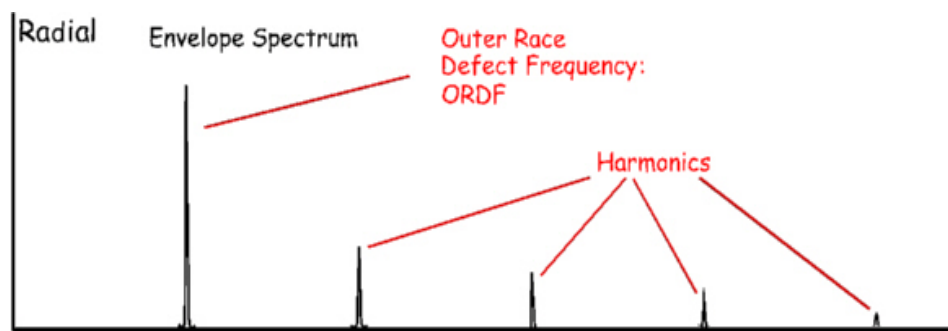


Figura 14 -Gráfico típico de Envolvente mostrando la frecuencia de los impactos del defecto del rodamiento.

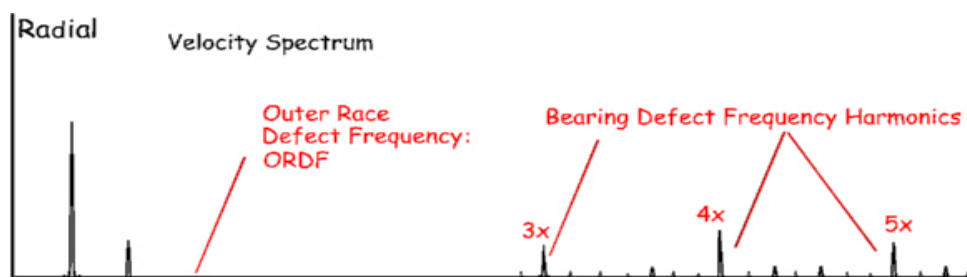


Figure 15 -Espectro típico de Velocidad mostrando etapa temprana del defecto del rodamiento. Las amplitudes pueden ser muy bajas en esta etapa. En el espectro de aceleración se mostrarán a alta frecuencia picos más claros.



- La frecuencia del impacto es desplegado en el gráfico de envolvente en Fig.14. El pico más alto: 1x frecuencia del defecto.
- Figura 15 –el FFT velocidad - muestra la condición del rodamiento.
- Las armónicas de la frecuencia del defecto pueden ser muy bajas en amplitud (aun no observables) en etapas tempranas.
- Típicamente no habrá un pico a 1x de la frecuencia del defecto en las FFT de velocidad y aceleración en etapa temprana del defecto.
- En el análisis, colocar el cursor en la frecuencia del defecto del rodamiento e intentar la utilización de los alineadores de armónicas a picos más altos de frecuencia.

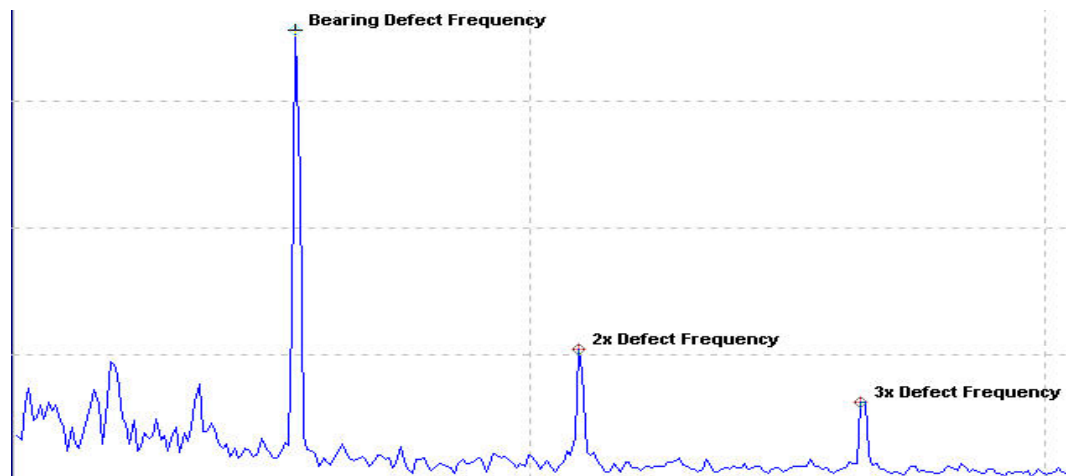


Figura 16 -Gráfico de envolvente. Obsérvese la diferencia en la apariencia de la FFT. Los impactos son remodulados generando frecuencias específicas.

- Las figuras 16 y 17 muestran un ejemplo real de los dos tipos de gráficos analizados en etapas tempranas.
- La FFT de velocidad provee condición del rodamiento (cuan malo está).
- Una medición de la intensidad de impacto (qué tan rápido se deteriorará el rodamiento) puede ser evaluado escalando la envolvente en dB (medición logarítmica) y comparar la amplitud de los picos del defecto del rodamiento.

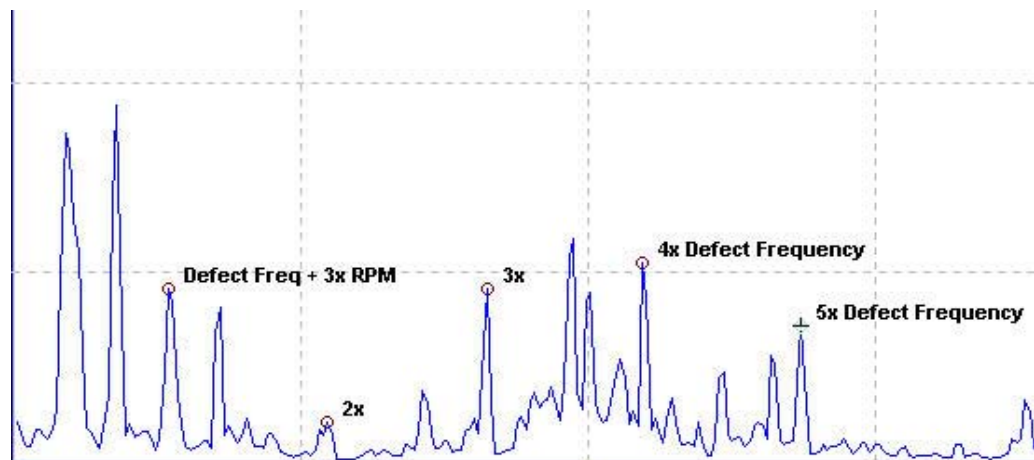


Figura 17 – Espectro típico de velocidad mostrando síntoma del estado temprano de defectos en los rodamientos.

Síntomas del estado de falla avanzado de los rodamientos

Progreso de los defectos del rodamiento:

- En estado avanzado del defecto del rodamiento, los impactos generalmente disminuyen en intensidad debido al desgaste de los componentes.
- La figura 18 muestra el espectro de velocidad observándose el progreso de los síntomas del defecto.
- La frecuencia del defecto a 1x se hace visible en el espectro de velocidad.
- El ruido alrededor de los picos relacionados con el rodamiento continúa en incrementos según la forma de la señal se distribuye más, debido al desgaste del rodamiento y a la cercanía de la falla de los componentes.

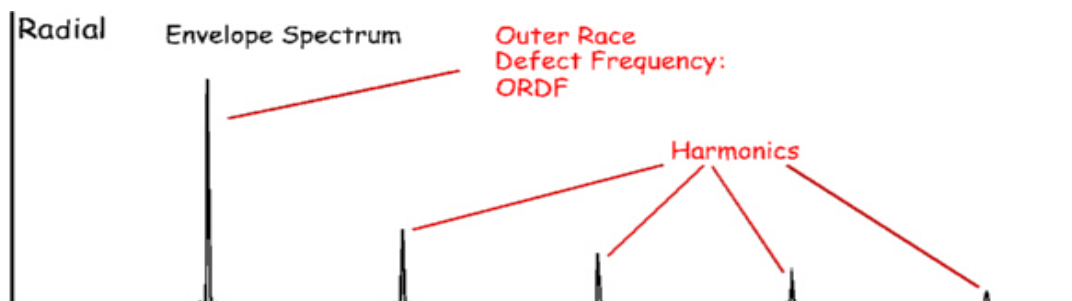


Figura 18 –Gráfico típico de envoltura mostrando impactos a la frecuencia de defecto del rodamiento. Las amplitudes deben decrecer según continúa empeorando el rodamiento.

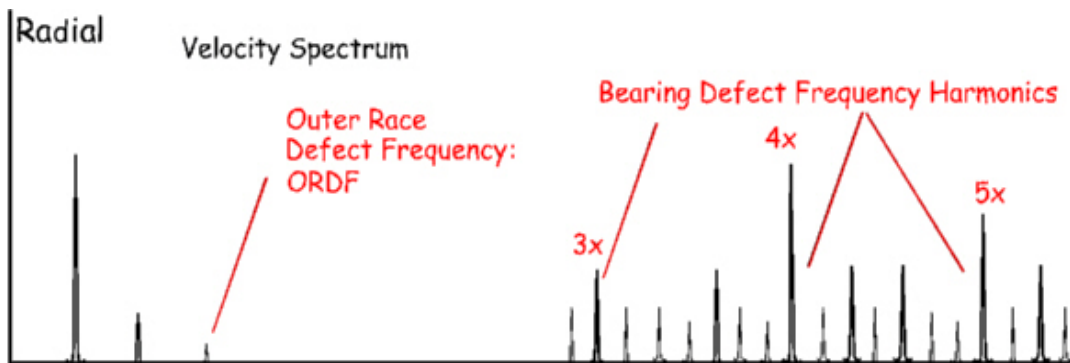


Figura 19 –Espectro de velocidad típico mostrando el estado temprano de defecto del rodamiento. Las amplitudes pueden ser muy bajas en este estado. Estas deben observarse en el espectro de aceleración, el cual mostrará picos a altas frecuencias más claros.

- Las figuras 20 y 21 muestran las dos mismas lecturas mostradas anteriormente un mes después.
- Observe la mejora en la envolvente mostrada en figura 20. Esto es simplemente porque los impactos son menos intensos.

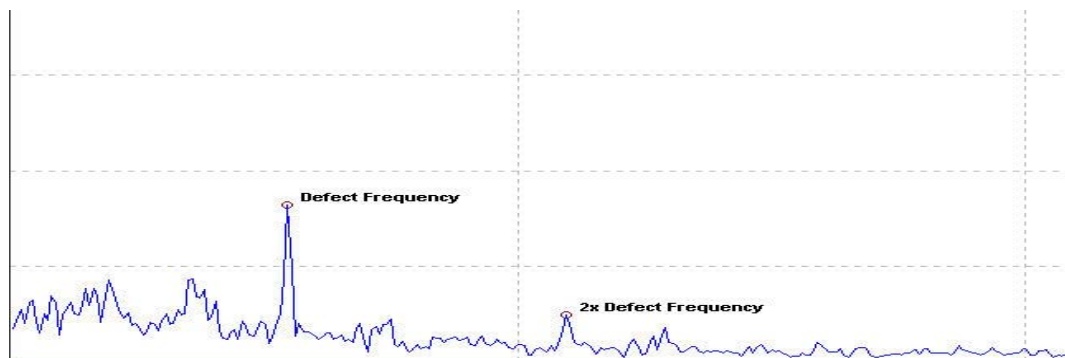


Figura 20 –Gráfico de envolvente. Observar la diferencia en apariencia de las FFT. El nivel es una medida de las fuerzas friccionales que están siendo detectadas.

- Observar también como se muestra en la FFT de velocidad el deterioro de la condición del rodamiento mostrado en la figura 21.
- El incremento significativo de las amplitudes de las frecuencias relacionadas con el rodamiento (armónicas de la frecuencia del defecto) indica que está en una condición mucho peor.

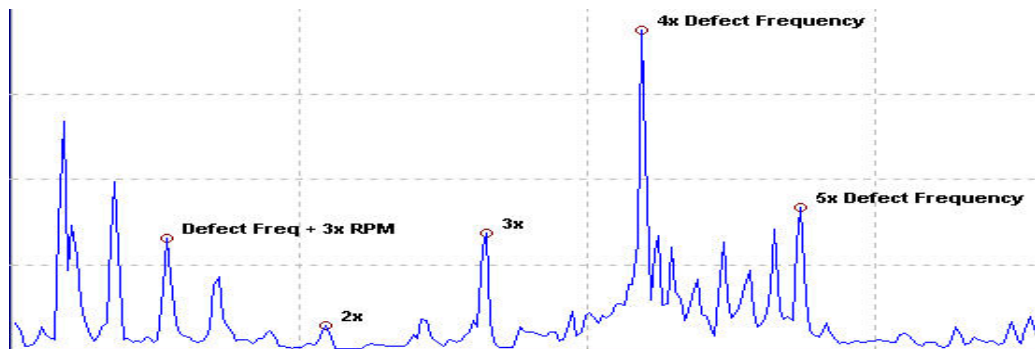


Figura 21 –Espectro de velocidad típico mostrando avance de los síntomas del defecto del rodamiento.

Síntomas típicos de los rodamientos y técnicas de análisis

Anteriormente se mostraron la progresión típica de los defectos de los rodamientos en el espectro de velocidad y los gráficos de envolventes. Sin embargo, existen muchas formas en que se puede desarrollar un defecto en los rodamientos. Hay también una gran variedad de métodos que son efectivos en la detección de estos defectos, ellos incluyen el uso del espectro de aceleración, gráficos en dominio del tiempo, detección de ruido ultrasónico, etc. El analista tiene que ser capaz de censar cuando un rodamiento malo está en desarrollo y aplicar el método de detección apropiado.

II.4 ACERCA DEL ANÁLISIS ESPECTRAL DE CORRIENTE

El análisis espectral de corriente constituye un complemento para el diagnóstico mediante vibraciones, este último tiene limitaciones al detectar problemas tales como excentricidades en el entre hierro, barra rotas en los rotores y el aislamiento de los devanados de los motores de inducción causados por esfuerzos mecánicos, magnéticos o térmicos [14].

Desde hace una década, esta técnica predictiva, conocida como Motor Corrient Signature Analyze (MCSA) tiene una probada fiabilidad en la detección de problemas eléctricos. Utiliza como transductor una pinza amperimétrica que convierte la corriente de alimentación a milivoltios, para proceder al análisis FFT con una resolución que permite separar la frecuencia de la red eléctrica de sus bandas laterales.



La técnica de análisis de corrientes del estator se basa en que cualquier agente que afecte el campo magnético en el entrehierro de un motor se verá reflejado en componentes de frecuencia características en el espectro de las corrientes del estator.

De esta forma, una falla en barras de rotor o en la pista de un rodamiento causará cambios en la densidad de flujo magnético a través del entrehierro. Esto a su vez ocasionará la aparición de componentes de frecuencia características en el espectro de corrientes del estator. Estas componentes de frecuencia están relacionadas con posibles defectos por modelos matemáticos basados en teoría general de máquinas eléctricas y dependen básicamente de la frecuencia de suministro de corriente, la velocidad del motor y su configuración (dimensiones del rodamiento, número de bolas, número de polos).

El diagnóstico en línea de motores mediante el análisis de las corrientes de fase es un método no invasivo para detectar la presencia de fallas incipientes tanto mecánicas como eléctricas. Esta técnica se basa en el análisis de los espectros en frecuencia de alta resolución de la corriente de alimentación del motor operando en línea bajo condiciones de carga nominal.

La técnica de diagnóstico en línea basada en el análisis de las corrientes de fase [Carvajal Martínez, F.A. et al., 1998] utiliza la medición simultánea de las tres corrientes de fases del motor y permite detectar diversas condiciones de falla en los motores eléctricos que no pueden diagnosticarse adecuadamente a través de la simple medición de vibraciones mecánicas como son:

- Ruptura de barras del rotor.
- Grietas en anillos de cortocircuito de la jaula.
- Falsos contactos en soldaduras de la jaula.
- Irregularidades estáticas y dinámicas del entrehierro.
- Desbalances magnéticos.
- Porosidades en la fundición del rotor



Los defectos en las barras del rotor provocan altas temperaturas y pérdida de par en el motor, su detección mediante esta técnica se basa en el análisis del espectro de las corrientes de fase en el dominio de la frecuencia. El espectro en frecuencia de las corrientes de fase medidas en el dominio del tiempo se obtiene por la aplicación de la transformada rápida de Fourier (FFT). Este análisis se lleva a cabo para detectar armónicas que se atribuyen directamente a barras rotas, anillos terminales fisurados, flechas torcidas o chumaceras en mal estado. Las señales de corriente en el dominio del tiempo se obtienen utilizando pinzas amperimétricas. Las pruebas realizadas tanto en campo como en el laboratorio de motores del IIE [Carvajal Martínez, F.A. et al., 1998] han demostrado que la existencia de barras rotas en el rotor del motor produce flujos armónicos en el entrehierro con componentes de corrientes en los devanados del estator a una frecuencia de $(1 \pm 2s)f_1$ Hz, donde s es el porcentaje de deslizamiento y f_1 es la frecuencia de línea del motor.

II.4.1 Fuentes Mecánicas de Vibraciones Típicas en Motores

Los motores eléctricos padecen de todos los defectos mecánicos que se encuentran en otras máquinas rotativas y de algunos otros típicos como se verá a continuación.

Flexión termal del Rotor

Un calentamiento desigual del rotor, debido a una distribución de corriente desigual por la barra del rotor desalineada, causa una distorsión o una flexión en el rotor. La flexión del rotor resulta en una condición de desbalanceo con todos sus síntomas usuales. Se puede detectar por el hecho que desaparece cuando el motor está frío.

Excentricidad en el espacio de Aire

Si el espacio de aire no está uniforme, las fuerzas en el rotor no son balanceadas y esto resulta en una alta vibración inducida magnéticamente a 120 Hz. La atracción magnética es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el estator y el rotor, y por eso, una pequeña excentricidad causará una vibración relativamente importante.



Holgura en el Rotor

A veces el rotor puede deslizarse en la flecha, por lo general de manera intermitente dependiendo de la temperatura, lo que causará una fuerte vibración en 1x y armónicos. Cambios abruptos en carga y voltaje de línea pueden iniciar esto.

Rotor excéntrico

Si el rotor no está redondo, causará una excitación en 1x y fuerzas magnéticas desbalanceadas que causan una vibración a la frecuencia de deslizamiento, multiplicado por el número de polos. Este componente desaparecerá inmediatamente, cuando se apaga la corriente, y eso sirve de prueba de confirmación.

Holgura en enrollamientos

Si los enrollamientos eléctricos del estator del motor presentan aunque sea una holgura ligera, el nivel de vibración a 120 Hz se incrementará. Esta situación es altamente destructiva, porque consume el aislamiento del alambre, lo que provoca vueltas en cortocircuito y al final, cortocircuitos hacia la tierra y falla del estator. En algunas máquinas, como generadores CA, la holgura en los enrollamientos generará armónicos de media orden de la frecuencia de excitación de 120 Hz.

Problemas de Barra del Rotor

Una manera importante de fallar de los motores eléctricos grandes, es el agrietamiento y el calentamiento y la rotura de barras de rotor, especialmente en motores que arrancan con frecuencia bajo carga. La condición de arranque pone la tensión más alta sobre las barras del rotor debido a que ellas cargan la corriente más alta, el rotor corre a una velocidad mucho mas baja que la velocidad sincrónica.

Las altas corrientes causan un calentamiento y una expansión de las barras con relación al rotor y debido a las diferencias en la resistencia eléctrica de las barras individuales, el calentamiento y la expansión serán desiguales. Esto lleva a un agrietamiento de las juntas, donde las barras están soldadas al anillo de cortocircuito. Tan rápido como aparezca una grieta, la resistencia de la barra se incrementa, lo que incrementa el calentamiento y empeora la grieta. Al mismo tiempo, las barras del rotor



vecinas recibirán corrientes incrementadas debido a la corriente reducida en la barra rota. Esta secuencia resulta en el calentamiento del rotor, lo que le causa una distorsión.

II.4.2 Fuentes de Vibraciones Eléctricas en Motores

En un motor eléctrico, el doble de la frecuencia de línea (120 Hz en Cuba) siempre es un componente de vibración que se puede medir. A esta frecuencia la atracción entre el rotor y el estator es variable y las dimensiones del hierro cambian un poco en presencia de un campo magnético variable debido a la constricción magnética.

Vibración relacionada con el Deslizamiento

Irregularidades en las barras del rotor causarán vibración a la frecuencia de deslizamiento multiplicado por el número de polos en el motor. Por ejemplo en el motor de dos polos cualquier barra de rotor estará alineada con el polo magnético girando creado por el estator en dos ocasiones para cada ciclo de deslizamiento. El ciclo de deslizamiento es la velocidad sincrónica dividida entre la velocidad de deslizamiento.

Por ejemplo en un motor de 3450 RPM la velocidad sincrónica es 3600RPM y la frecuencia de deslizamiento es de $3600 - 3450 = 150$ RPM. Por es $3600 : 150 = 24$ lo que es el ciclo de deslizamiento. Esto quiere decir que para cada 24 revoluciones del rotor la misma barra del rotor será exactamente alineada con la misma polaridad del polo magnético giratorio y estará alineado una vez cada 12 revoluciones con el polo giratorio opuesto.

Si una barra de rotor tiene más resistencia que las otras, debido a grietas o roturas, habrá menos corriente inducida en ella, cuando está alineada con los polos y esto producirá un poco menos de torque en este punto del ciclo de deslizamiento: de esa manera, el torque será modulado a la frecuencia de deslizamiento multiplicada por dos veces el número de polos. Este se puede ver en un componente de vibración en la firma y también resulta en bandas laterales alrededor del componente de vibración $1x$ y alrededor de los armónicos de $1x$ a una distancia de $2S$ veces el número de polos.



Frecuencia de Paso de Ranuras del Estator

Otro componente de vibraciones en motores eléctricos es la llamada frecuencia de paso de ranuras. Esta frecuencia es el número de ranuras en el estator multiplicado por las RPM. Las ranuras del estator contienen los enrollados conductivos y su número finito produce una falta de uniformidad en el campo rotativo magnético, lo que causa un componente de vibración. Las barras del rotor también están en ranuras y la frecuencia de paso de las barras del rotor también a veces se llama frecuencia de paso de ranuras y es diferente del paso de ranuras del estator.

Láminas en corto

El rotor y el estator de motores CA están hechos de hojas delgadas aisladas unas de otras. Esto impide que las corrientes inducidas magnéticamente circulen en el hierro y provoquen calentamiento. Si las hojas están puestas en cortocircuito, en algunos lugares un calentamiento local ocurrirá, y una distorsión termal resultará. Hojas en corto también causarán niveles de vibración más altos a 120 Hz.

II.4.3 Monitoreo de la Barra del Rotor para Análisis Espectral de Corriente [17]

El estado de las barras del rotor en un motor a inducción se puede medir, haciendo un análisis de frecuencia con alta resolución de la corriente de entrada del motor.

La presencia de una barra de rotor defectuosa causará una ligera reducción en el torque del motor, cada vez que un polo del campo magnético rotativo pasa cerca de ella. Este ocurre con el doble de la frecuencia del deslizamiento, ya que los polos Nortes y Sures del campo causan una reducción momentánea en el torque.

Esta reducción también resulta en una reducción en la corriente de entrada hacia el motor en la misma proporción, -esto es el resultado de la conservación de energía. Esta reducción periódica en la corriente del motor, en realidad es una modulación de amplitud de la misma. La cantidad de modulación está relacionada con la gravedad del problema de la barra del rotor.



Una buena manera para detectar si hay modulación de la corriente es de buscar las bandas laterales alrededor de 60 Hz, colocadas a una distancia de dos veces la frecuencia del deslizamiento. Esto se puede hacer colocando una pinza en una fase de la línea de entrada y conectándola a un analizador de espectros.

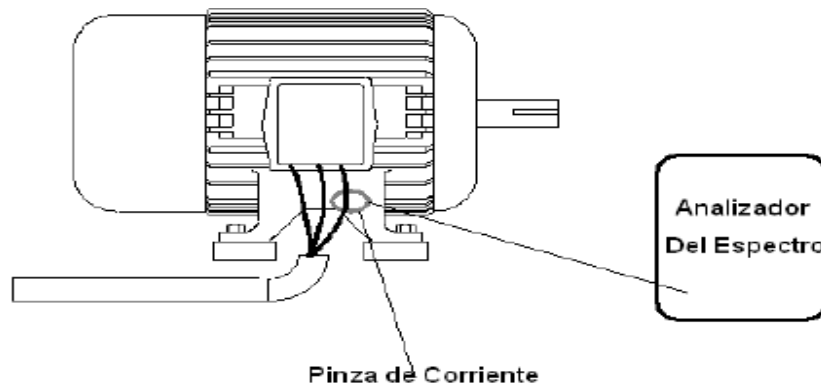


Figura 22 –Esquema para obtener espectro corriente del motor.

Para esta prueba el motor deberá operar bajo carga. Sin carga el deslizamiento es muy lento y no se desarrolla ningún torque apreciable. Solamente se necesita medir una fase del motor.

El analizador de espectro deberá ser capaz de generar un espectro de alta resolución desde 0 Hz hasta 70 Hz o un espectro zoom, desde 50 a 70 Hz. Una resolución de frecuencia de 1600 líneas es aconsejable para separar las bandas laterales causadas por variaciones de carga.

La alta resolución y el espectro zoom son necesarios, porque las bandas laterales de la frecuencia de deslizamiento estarán muy cerca en frecuencia de la línea de frecuencia de 60 Hz.

Si las bandas laterales están a una distancia de 55 a 60 dB del pico de 60 Hz, se considera que las barras del rotor son buenas, pero si se incrementan a 40 dB, abajo del pico de 60 Hz, eso es una indicación de barras dañadas. Es posible calibrar un sistema como eso y relacionar el número de barras abiertas, al nivel de bandas laterales si se conoce el número de barras en el rotor.



II.4.4 Fundamentos cualitativos y análisis de la señal de corriente en motores eléctricos

La corriente de estator en las máquinas de inducción contiene generalmente armónicos que se deben a que la disposición de los devanados en las ranuras no es perfectamente sinusoidal sino escalonada, a las imperfecciones o irregularidades originadas en la fabricación del motor y a las posibles componentes armónicas presentes en la fuente de alimentación. Ante un cortocircuito en alguna de las bobinas del estator, ya sea entre bobinas o espiras de la misma fase o entre bobinas de fases diferentes, la configuración de la fuerza magnetomotriz giratoria se ve afectada y como consecuencia, las componentes armónicas de las corrientes de estator también ven afectadas sus amplitudes. Teniendo en cuenta esto último, y realizando un seguimiento periódico del espectro de frecuencias de las corrientes de estator es posible detectar pequeños cortocircuitos y evitar consecuencias drásticas.

Las frecuencias que se ven afectadas por este tipo de fallo están dadas por [18]:

$$f_1 \cdot \left[k \pm n \cdot \frac{(1-s)}{p} \right] \quad (1)$$

con $k = 1, 3$ y $n = 1, 2, 3, \dots (2p-1)$ y donde f_1 es la frecuencia de la fuente de alimentación, s , el deslizamiento del motor y p el número de pares de polos.

Es importante destacar que, tal como se observa en (1), las componentes afectadas son función del deslizamiento y por ende la frecuencia a la que se manifiestan dependen del estado de carga del motor. Asimismo, la variación de la amplitud en las componentes armónicas que se ven afectadas por un fallo es variable con la carga del motor, por lo cual, es conveniente realizar las comparaciones para estados de cargas similares.

La incidencia de un fallo sobre cada componente armónica es variable de un motor a otro y depende fundamentalmente de las características del devanado. En algunos casos, inclusive, algunas componentes pueden reducir su valor ante un fallo.



En lo que se refiere a fallos en el rotor, la fractura de una de sus barras o de uno de sus anillos de cortocircuito, convierte al rotor en un circuito trifásico desequilibrado [19]. Tal desequilibrio se manifiesta por medio de la circulación de corrientes de secuencia inversa. Como consecuencia de ello, se establece un campo magnético que gira en sentido contrario al sentido de rotación del rotor, con una velocidad:

$$\omega_{CGI} = -s \cdot \omega \quad (2)$$

donde ω_{CGI} indica la velocidad del campo giratorio inverso con respecto al rotor y s el deslizamiento en tanto por unidad. La velocidad del campo giratorio inverso con respecto al estator resulta:

$$\omega_{CGI}^s = -s \cdot \omega + (1-s) \cdot \omega = \omega - \omega_0 \quad (3)$$

donde:

$$\omega_0 = 2 \cdot s \cdot \omega \quad (4)$$

Este campo giratorio provoca un nuevo par sobre el rotor, a frecuencia:

$$f_0 = 2 \cdot s \cdot f \quad (5)$$

siendo f la frecuencia de la red. Este par, a su vez, ocasiona una oscilación en la velocidad del rotor, cuya amplitud depende de la inercia acoplada. Tales oscilaciones afectan a las corrientes de estator, sobre las cuales se inducen las denominadas bandas laterales dadas a las frecuencias:

$$f_s = (1 \pm 2 \cdot s) \cdot f \quad (6)$$

Estas bandas laterales permiten identificar claramente fallos en el rotor, las frecuencias a las que se manifiestan son función del deslizamiento del motor y su amplitud es fuertemente dependiente del estado de carga. Un diagnóstico correcto exige como mínimo que el motor se encuentre por encima de la mitad de su carga nominal. Algunas cargas que presentan pares pulsantes (tales como los compresores) pueden provocar bandas laterales similares a las producidas por un fallo e interferir en el diagnóstico [20].



Las excentricidades en el rotor, por otra parte, provocan armónicos a frecuencias dadas por [21]:

$$f_{exc} = f_s \cdot \left[1 \pm m \cdot \left(\frac{1-s}{p} \right) \right] \quad (7)$$

con $m = 1, 2, 3, \dots$ y donde f_{exc} es la frecuencia de los armónicos afectados por el fallo, s es el deslizamiento, p el número de pares de polos y f_1 la frecuencia de la red de alimentación.

Finalmente, algunos trabajos demuestran la capacidad de esta técnica para la detección de fallos producidas en los rodamientos [22]. Un fallo en algún elemento rodante del rodamiento provoca vibraciones a la frecuencia dada por:

$$f_b = \left(\frac{p_d}{b_d} \right) \cdot f_{rm} \cdot \left[1 - \left(\frac{b_d}{p_d} \cdot \cos(\beta) \right)^2 \right] \quad (8)$$

Donde n es el número de elementos rodantes, f_{rm} , la velocidad de rotación en vueltas por segundo, p_d es el diámetro medio del rodamiento, b_d el diámetro de cada bola y β el ángulo de contacto de las bolas con las pistas del rodamiento.

Estas vibraciones en el rotor de la máquina se traducen en componentes armónicas en las corrientes del estator y, de este modo, el fallo puede ser identificado.

Del mismo modo, fisuras en la pista exterior derivan en vibraciones a la frecuencia siguiente:

$$f_o = \left(\frac{n}{2} \right) \cdot f_{rm} \cdot \left[1 - \frac{b_d}{p_d} \cdot \cos(\beta) \right] \quad (9)$$

Y se manifiestan en la corriente del estator a través de componentes a frecuencias:

$$|f_e \pm k \cdot f_o| \quad (10)$$



Las fisuras o defectos en la pista interior de un rodamiento producen vibraciones a la frecuencia dada por:

$$f_i = \left(\frac{n}{2}\right) \cdot f_{rm} \cdot \left[1 + \frac{b_d}{p_d} \cdot \cos(\beta)\right] \quad (11)$$

y se traducen en componentes en las corrientes de estator a frecuencias dadas por:

$$|f_e \pm k \cdot f_i| \quad (12)$$

Es importante destacar que para este tipo de fallos, el empleo del espectro de armónicos de la corriente de estator se ha implementado en pruebas de laboratorio y con fallos provocadas intencionalmente. A diferencia de los demás fallos, en este caso aún no se ha reportado un número suficiente de aplicaciones reales que permitan ponderar la capacidad de diagnóstico de esta técnica en un entorno industrial.

Conclusiones del capítulo:

- Fueron analizadas las estrategias de mantenimiento, definiendo al mantenimiento predictivo como el más eficiente.
- Acercamiento a las técnicas análisis de la señal de corriente del estator y de vibraciones.
- Se expusieron los defectos más comunes de los motores de inducción a diagnosticar mediante el análisis frecuencial.



CAPITULO III.

METODOLOGÍA DE DIAGNOSTICO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES



III.1 Introducción

Los estudios relacionados con la detección de fallas eléctricas en los devanados de máquinas rotativas han sido normalmente orientados hacia el análisis y toma de medidas de parámetros eléctricos tales como la corriente, el voltaje y el flujo magnético. Tradicionalmente, las aplicaciones de monitoreo de fallas por medio de la tecnología de vibraciones mecánicas de motores han sido enfocados a detectar fenómenos mecánicos tales como: desbalance, excentricidades, condición de los rodamientos, etc. Sin embargo la teoría predice, que los cambios de corriente debidos al deterioro eléctrico de los devanados en una máquina rotativa, puede alterar las fuerzas magnéticas internas que a su vez modifican las características de vibración de la máquina; de modo que el monitoreo por medio de la vibración mecánica, puede ser un exitoso indicador de la condición eléctrica de los devanados.

El análisis de la señal de corriente es una técnica usada para determinar condiciones de operación de los motores AC de inducción sin interrumpir producción. Esta técnica puede ser usada en conjunto con el análisis de vibración para confirmar decisiones claves en el diagnóstico de la maquinaria.

III.2 Metodología para el diagnóstico vibro-eléctrico

A continuación se enumera y se detalla paso a paso mediante un orden lógico la metodología donde se combina el análisis de vibraciones con el de corriente para lograr un diagnóstico vibro-eléctrico del motor:

1. Medición de la intensidad vibratoria del motor y evaluación del estado técnico.
2. Análisis frecuencial de las vibraciones y detección presencia de problemas eléctricos.
3. Evaluación y diagnóstico mediante el Análisis de Señal de Corriente del Motor (MCSA) de los problemas eléctricos.
4. Identificar y evaluar los problemas mecánicos mediante análisis de vibraciones.
5. Planificación de las acciones correctivas.
6. Control de calidad y registro.



III.2.1 Medición de la intensidad vibratoria del motor y evaluación del estado técnico del motor.

Los datos obtenidos con el sensor de vibraciones, son la materia prima del monitoreo de condición. Se debe garantizar que los datos sean de la máxima calidad. Después de realizar la medición de los niveles de vibraciones en cada punto, se define el estado técnico, en la figura siguiente se muestran las principales formas:



Figura 23: Métodos para diagnosticar estado técnico.

En la figura se observa que a medida que avanza de izquierda a derecha mejora la confiabilidad del diagnóstico del estado técnico.

En dependencia del estado técnico se determinarán las acciones posteriores, de forma general:

- Estado aceptable, registrar resultados. Nueva medición según planificación.
- Estado no aceptable, proceder al análisis de los defectos y posibles causas.



III.2.2 Análisis frecuencial de las vibraciones y detección presencia de problemas eléctricos:

El análisis frecuencial es la técnica más utilizada para determinar el estado de las máquinas. Permite determinar la gran mayoría de las averías en la maquinaria rotativa. También permite detectar la presencia de problemas eléctricos en el espectro de vibraciones, como se verá más adelante.

El identificar la presencia de problemas eléctricos nos obliga a realizar el análisis frecuencial de corriente, de no existir se pasaría directo al análisis de vibraciones e identificar los problemas mecánicos.

Para detectar problemas eléctricos de los motores de inducción se exponen a continuación las características a tener en cuenta en el espectro de vibraciones:

Análisis de la frecuencia de red

Varias son las señales de vibraciones mecánicas generadas por fallos eléctricos en los circuitos del motor. Una de las más comunes es una señal al doble de la frecuencia de la red de alimentación o línea. Para la red de alimentación en Cuba de 60 Hz, el doble sería 120 Hz o 7200 CPM. Es muy frecuente que cuando el espectro muestra alta vibración a esta frecuencia asociarlos a problemas eléctricos ya sea en el entrehierro y/o daños en los devanados o aislamiento del estator. Se debe tener cuidado al examinar motores de dos polos (3600 RPM) confundir la señal del doble de la velocidad de rotación en lugar del doble de la frecuencia de línea.

Se recomienda utilizar 3200 líneas FFT de resolución y una frecuencia máxima de 1200 CPM con el propósito de:

- Intentar separar las frecuencias de vibración mecánicas y eléctricas, particularmente en la vecindad de 1XRPM, frecuencia de la línea (3600 CPM o 60 Hz) y 2X frecuencia de línea (7200 CPM o 120 Hz).
- Detectar la posible presencia de bandas laterales alrededor de las armónicas de la velocidad de rotación a frecuencia del paso de los polos (F_p). $F_p = \text{Frecuencia Deslizamiento} \times \text{\#Polos}$.



Debido a la alta resolución y además una frecuencia pequeña es recomendable utilizar un 50 % de Overlap de procesamiento, tomando dos promedios para esta medición. Realizar medición en el housing del rodamiento interior en la dirección horizontal.

Es necesario aclarar que el resultado final de estas mediciones es crítico, esta solo permitirá al analista separar los problemas eléctricos y mecánicos, y detectar grietas o roturas de las barras del rotor potencialmente serias. También permitirá detección de la frecuencia subsincrónica de defecto en la correa, para tal caso.

Roturas de barras del rotor

Otra característica en el espectro de vibraciones para detectar problemas eléctricos es la presencia de 1X y 2X frecuencias de paso de las barras del rotor (RBPF) las cuales pueden estar acompañadas por bandas laterales a dos veces la frecuencia de línea (7200 CPM) y aun más por bandas laterales a 2X frecuencia deslizamiento.

La frecuencia de paso de las barras del rotor es igual al número de barras por las RPM del motor. Altas amplitudes a esta frecuencia sugiere soldaduras y/o excentricidad del rotor, particularmente cuando estas frecuencias están acompañadas por bandas laterales a frecuencia igual a 2X frecuencia de línea y/o deslizamiento.

La frecuencia máxima ($F_{\text{máx}}$) se debe ajustar a 360 000 CPM. El número de las barras del rotor en casi todos los motores es raramente conocido, pero normalmente están en el rango de 35 a 90. Por lo tanto, con esta $F_{\text{máx}}$ se podría capturar la 1ra y 2da armónica de las RBPF, aun en motores de dos polos y 3600 CPM nominal.

Se recomienda un espectro de 1600 líneas y de 8 a 16 promedios para identificar claramente las frecuencias de barras del rotor y las bandas laterales de dos veces la frecuencia de la línea. Aunque la $F_{\text{máx}}$ es bastante alta, aun 16 promedios a 1600 líneas podrían requerir de siete a diez segundos en total.

Asegurar que el transductor esté bien montado en el housing del motor debido a la alta $F_{\text{máx}}$. Normalmente las mediciones deben ser tomadas en la dirección horizontal en el housing del extremo exterior.



También la presencia de roturas en las barras del rotor hace que la frecuencia de rotación del motor sea modulada por el producto de la frecuencia de deslizamiento por el número de polos. Debido a este fallo mecánico se produce un desbalance eléctrico en el motor, que a la vez genera niveles de vibraciones suficientemente altos a la primera y segunda armónicas de la velocidad de rotación.

Excentricidad en el estator

Referida a la distribución no uniforme y estacionaria del espaciado entre el rotor y el estator, este defecto genera amplitudes altas a la segunda armónica de la frecuencia de línea. Además, las vibraciones son altamente direccionales, orientadas de acuerdo con la posición de la zona más estrecha, debido a que la mayor fuerza magnética se genera precisamente en aquella zona donde rotor y estator están más cerca. Tal defecto puede tener su origen no sólo en las deficiencias que pueda haber tenido el enrollado del motor durante alguna reparación sino también, en distorsiones que pueda haber sufrido la estructura interna del motor debido a golpes por caída, a la presencia de la “pata coja” o al centrado deficiente de los cojinetes del rotor.

Excentricidad en el rotor

Cuando la excentricidad tiene lugar en el rotor, éste no es concéntrico con su propio eje de rotación. Esto hace que también tenga lugar una distribución no uniforme del espaciado entre el rotor y el estator, pero en este caso, esta no uniformidad no es estacionaria sino que se traslada conjuntamente con la rotación del rotor. De igual forma, en este caso tienen lugar vibraciones altas a la segunda armónica de la frecuencia de línea, pero acompañada por bandas laterales espaciadas a la frecuencia de paso de los polos del motor.

Es importante destacar que un motor de inducción con su rotor excéntrico, incrementará sus niveles de vibraciones con el transcurso del tiempo de operación, debido a los incrementos en la temperatura de éste.



Corto circuito en el enrollado del estator

El enrollado del estator, comúnmente denominado polos o campos puede presentar espiras en corte lo cual hace que disminuya la velocidad de rotación y se incremente la frecuencia de deslizamiento. En el espectro se observan bandas laterales a la frecuencia de deslizamiento por el número de polos del motor.

III.2.3 Evaluación y diagnóstico mediante el Análisis de Señal de Corriente en Motores eléctricos (MCSA) de los problemas eléctricos

El propósito fundamental del MCSA es evaluar la condición de las barras del rotor. Las fallas de rotor representan alrededor del 5%-10% de las fallas totales [23]. La regla básica es simple: bandas laterales a frecuencia de paso de los polos alrededor de la frecuencia de la red de alimentación, cuando el motor se encuentra bajo carga. La regla estándar ha determinado que las barras del rotor están graves cuando los picos de las bandas laterales se aproximan a 35 dB del pico de la frecuencia de línea.

▪ Detección y evaluación de la condición de barras del rotor.

Para un motor trifásico de corriente alterna de P pares de polos, con una velocidad sincrónica N_s , se cumple que:

$$f_1 = N_s \cdot P$$

$P = N^\circ$ pares de polos

f_1 = frecuencia de alimentación de las bobinas del estator (Hz)

N_s = Velocidad de sincronismo (rev/seg)

(13)

Si la simetría del rotor es perfecta entonces solo existe un campo magnético giratorio sincrónico.

Definiendo el deslizamiento del rotor como:

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

Con: N_r = Velocidad del rotor

(14)



Entonces,

$$\begin{aligned} f_2 &= (N_s - N_r).P \\ f_2 &= s.N_s.P \end{aligned} \quad \boxed{\text{Siendo: } f_2 = \text{frecuencia de la corriente del rotor}} \quad (15)$$

La velocidad de rotación del campo magnético producido por la corriente de los conductores del rotor con respecto al estator es:

$$N_r + N_2 = N_r + N_s - N_r = N_s \quad (16)$$

La rotura de barras del rotor genera una asimetría en el diseño, lo cual produce un campo magnético rotativo de sentido contrario al giro del rotor:

$$N_s - N_r = s.N_s \quad (17)$$

Si se sitúa un observador en el estator, este aprecia un campo magnético rotativo (N_b) hacia atrás y hacia adelante producido por las barras rotas.

Como es un campo pulsante, este se descompone en dos campos giratorios a velocidad relativa $\pm N_b$ por lo tanto el que va hacia delante va a girar con una velocidad absoluta $N'_b = N_r + s.N_s = N_s$ por lo que no se aprecia en el análisis de frecuencias.

$$N_b = N_r - s.N_s \quad (18)$$

siendo:

$$\begin{aligned} s &= \frac{N_s - N_r}{N_s} \\ N_r &= N_s(1 - s) \end{aligned} \quad (19)$$

Por lo tanto;

$$N_b = N_s - 2.s.N_s \quad (20)$$

Expresándolo en términos de:

- frecuencia (f_b)
- Número de pares de polos



$$\left. \begin{aligned} f_b &= (N_z - 2.s.N_z).P \\ f_b &= \left(\frac{f_1}{P} - 2.s.\frac{f_1}{P}\right).P \\ f_b &= f_1 - 2.s.f_1 \\ f_b &= f_1(1 - 2.s) \end{aligned} \right| \quad (21)$$

Donde f_b es la frecuencia a la cual el campo magnético rotativo corta las bobinas del estator induciendo así, una corriente de frecuencia f_b .

Esto significa que f_b es la doble frecuencia de deslizamiento que se manifiesta a una distancia $2.s.f_1$ por debajo de la frecuencia de alimentación del motor f_1 .

Las oscilaciones en velocidad y torque que ocurren a la frecuencia $2.s.f_1$ inducen la banda superior a una distancia $2.s.f_1$ de la frecuencia de alimentación [24]:

$$f_b = f_1(1 \pm 2.s) \quad (22)$$

Estas son las componentes clásicas de frecuencia en el caso de barras rotas. La diferencia de amplitud entre los picos de la fundamental y estas bandas laterales es una indicación del estado del motor.

Estas bandas laterales permiten identificar claramente fallos en el rotor, las frecuencias a las que se manifiestan son función del deslizamiento del motor y su amplitud es fuertemente dependiente del estado de carga. Un diagnóstico correcto exige como mínimo que el motor se encuentre por encima de la mitad de su carga nominal.

Algunas cargas que presentan pares pulsantes (tales como los compresores) pueden provocar bandas laterales similares a las producidas por un fallo e interferir en el diagnóstico.

La práctica indica que una diferencia de 60 dB o más indica un motor en buen estado. Al comenzar el deterioro la amplitud de las bandas laterales aumenta. Cuando la diferencia es del orden de 48 dB existen conexiones de alta impedancia y si se llega a



35 dB existirán varias barras rotas. En la tabla siguiente se muestran algunos valores usados como criterios de evaluación del grado de deterioro [25]:

Tabla 2: Criterios de evaluación del grado de deterioro del rotor en función de FI/Fp.

Nivel de deterioro	FI/Fp (dB)	Estado del rotor	Acción recomendada
1	>60	Excelente	Ninguna
2	54-60	Bueno	Ninguna
3	48-54	Moderado	Iniciar seguimiento de datos
4	42-48	Posibles fisuras incipientes de barras o uniones de alta resistencia	Aumentar la frecuencia de los ensayos
5	36-42	Una o dos barras fisuradas o rotas	Realizar análisis de vibraciones para confirmar
6	30-36	Varias barras fisuradas o rotas	Reparar
7	<30	Varias barras fisuradas o rotas	Reparar o remplazar

Debido a las variables que afectan la frecuencia de estas bandas laterales y su magnitud, la estrategia del diagnóstico debe considerar lo siguiente:

- Los diferentes diseños del rotor (número de polos, ranuras del rotor, etc.)
- Diferentes condiciones de carga.
- Características de las cargas mecánicas.
- Componentes mecánicos en el tren motriz.

Estos factores pueden afectar significativamente el diagnóstico y necesitan ser considerados.



▪ **Detección de excentricidad del rotor.**

Existen dos clases de excentricidades las cuales no son mutuamente excluyentes. Se conocen como excentricidad estática y dinámica.

La excentricidad estática se produce cuando la posición de mínima longitud del entrehierro radial está fija en el espacio. Esta puede ser causada por:

- Núcleo del estator ovalado.
- Posicionamiento incorrecto del rotor
- Posicionamiento incorrecto del estator.

Siempre existe un nivel inherente de excentricidad estática debida a defectos de fabricación u holgura.

La excentricidad dinámica tiene lugar cuando la longitud mínima del entrehierro gira con el rotor, siendo así función del espacio y tiempo. Esta puede ser causada por:

- Sección exterior del rotor no concéntrica con el eje.
- Deformación por temperatura.
- Desgaste de rodamientos.

Los fabricantes de motores acostumbran especificar la holgura radial total. O sea, la excentricidad estática más la dinámica. Siendo esta, por lo general, expresada en porcentaje de entrehierro nominal.

La ecuación que rige la excentricidad total es:

$$g(\phi, t) = g \cdot (1 - e_s \cdot \cos \phi - e_d \cdot \cos(\omega t - \phi))$$

Donde:

- g = longitud del entrehierro
- e_s = Excentricidad estática
- e_d = Excentricidad dinámica
- ω = Velocidad angular del rotor
- Φ = distancia angular alrededor del entrehierro

(23)



La frecuencia patrón de la excentricidad es:

$$f_{ec} = f_i \cdot \left[(r \pm n_d) \cdot \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm n_{ws} \right]$$

Donde:

- f_{ec} = Frecuencia de excentricidad
- f_i = Frecuencia de alimentación.
- r = N° de ranuras.
- $n_d = \pm 1$
- $n_{ws} = 1, 3, 5, 7$
- s = deslizamiento

(24)

Con $n_d=0$ esta fórmula da la clásica frecuencia de paso de las ranuras del rotor. Con $n_d=\pm 1$ se obtienen componentes adicionales que inicialmente se consideraban que eran consecuencia exclusivamente de la excentricidad dinámica del entrehierro. Una cantidad de pruebas experimentales han indicado que al aumentar la excentricidad estática, esos componentes también aumentaban. Esos componentes dependen de la excentricidad total del entrehierro.

▪ Detección de espiras en cortocircuito en el estator

El objetivo es poder detectar las componentes que se deben exclusivamente a espiras en cortocircuito y no a otras razones eléctricas o mecánicas.

Con respecto a los fallos en los bobinados, éstos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Cortocircuito de espiras contiguas
 - El motor puede seguir operando durante un tiempo incierto.
- Cortocircuito entre bobinas de una misma fase.
 - El motor puede seguir operando durante un tiempo incierto.
- Cortocircuito entre fases distintas
 - El motor falla y la protección desconecta la alimentación de potencia del motor.
- Circuito abierto en una fase
 - El motor puede seguir operando dependiendo de la carga a la que se lo someta y del equipo de protección que tenga.



Ecuación predictiva para el diagnóstico de cortocircuitos en estator mediante el análisis de señal de corriente en motores eléctricos (MCSA), estudios previos han demostrado que la siguiente ecuación da los componentes de la onda de flujo de entrehierro que son función de espiras cortocircuitadas.

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

Donde

- f_{st} = Frecuencias de componentes de onda que son función de espiras cortocircuitadas
- f_1 = Frecuencia de alimentación
- $n = 1, 2, 3, \dots$
- $k = 1, 3, 5, \dots$
- p = pares de polos
- s = deslizamiento

(25)

El diagnóstico de espiras cortocircuitadas via MCSA está basado en la detección de los componentes de frecuencia dados por la ecuación anterior. Las ondas de flujo rotativo a esas frecuencias inducen los correspondientes componentes de corriente en el bobinado del estator.

Valoración de influencias mecánicas

Cambios en la excentricidad del entrehierro afectan la forma del flujo del entrehierro. Con excentricidad dinámica la posición del rotor puede cambiar y cualquier oscilación en el largo del entrehierro ocasiona variaciones de flujo. Como consecuencia esto puede inducir componentes en la corriente de estator dadas por:

Influencia de reductores:

Las oscilaciones mecánicas ocasionan distintos componentes de frecuencia en la corriente. La presencia de reductores también ocasiona componentes en frecuencias cercanas a las de las barras rotas. Por lo tanto es importante para un correcto diagnóstico analizar la influencia de las cajas de engranajes en el espectro de frecuencias.



Por ejemplo, si se considera un motor de 50 Hz, 250 Kw., 500 V, 989 rpm que se conecta a un reductor de velocidad. La velocidad de salida del reductor de velocidad es de 19.39 rpm. La velocidad del eje de 19.39 rpm ocasiona dos componentes de frecuencia simétricamente distribuidas alrededor de la frecuencia de la red a 49.68 Hz y 50.32 Hz. Los armónicos de estos componentes aparecerán simétricamente alrededor de f_1 en 0.64 Hz, 0.97 Hz, 1.29 Hz, 1.62 Hz, etc.

De la ecuación dos se deduce que las frecuencias donde se encontrarán componentes debidas a barras rotas están definidas por

$$f_{1\max} = (1 - 2s_{f1})f_1 \quad (26)$$

Donde s_{f1} es el deslizamiento a máxima carga. En este ejemplo se supone que $s_{f1}=0.02$ dando los extremos en frecuencia en 48 Hz y 52 Hz. Así que hasta la sexta armónica de la frecuencia de giro del eje están presentes en esa banda. Por lo tanto es importante detectar las componentes de los reductores y eliminarlos del análisis.

Problemas en rodamientos:

Los fabricantes de los rodamientos proporcionan los valores de las frecuencias de falla. Cuando se hace un análisis de frecuencia de la corriente, si se encuentran picos importantes en estas frecuencias es posible identificar problemas.

El grado de deterioro se puede determinar basándose en las amplitudes relativas de estos picos y la frecuencia de línea.

Se ha visto que el MCSA puede detectar los problemas de roturas en barras del rotor, excentricidad en el entrehierro y cortos en espiras en los devanados del estator. Esta detección puede hacerse en estado temprano evitando así daños secundarios y falla completa del motor.

Para hacer un diagnóstico confiable es necesario tener en cuenta el efecto de las influencias mecánicas y la presencia de reductores de velocidad o cargas fluctuantes.

Tabla 3: Tipos de fallos y características.

Tipos de fallos	Observaciones
Estator Mecánicas (Ej: enrollados sueltos, movimiento núcleo, etc.)	Bandas laterales en la frecuencia de red.
Cortos en estator (espiras cortocircuitadas)	Bandas laterales en la frecuencia de red con bandas laterales en la velocidad de rotación.
Rotor	Bandas laterales en la frecuencia de red.
Excentricidad Estática	Bandas laterales en la frecuencia de red y a dos veces esta frecuencia.
Excentricidad Dinámica	Bandas laterales en la frecuencia de red y a dos veces esta frecuencia con bandas laterales en la velocidad de rotación.

III.2.4 Identificar y evaluar los problemas mecánicos mediante análisis de vibraciones:

La señal del espectro de vibraciones permite identificar defectos de los rodamientos, desbalance, desalineación, flexiones y otros problemas mecánicos. A manera de resumen se muestran a continuación.

DESBALANCE:

ESTÁTICO: Producido generalmente por desgaste radial superficial no uniforme en rotores en los cuales su largo es despreciable en comparación con su diámetro.

DINÁMICO: El desbalance dinámico ocurre en rotores medianos y largos, debido principalmente a desgastes radiales y axiales simultáneos en la superficie del rotor. La figura muestra el comportamiento espectral.

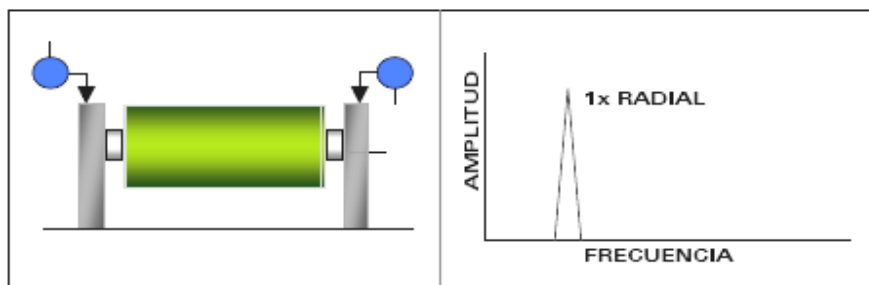


Figura 24: Espectro relacionado con desbalance.



Se recomienda para corregir la falla, balancear el rotor en DOS PLANOS con las masas adecuadas y en las posiciones angulares calculadas con un equipo de balanceo dinámico.

DESALINEACIÓN:

ANGULAR: Ocurre cuando el eje del motor y el eje conducido unidos en el acople, no son paralelos.

PARALELA: Los ejes del motor y del rotor conducido están paralelos, pero no son colineales.

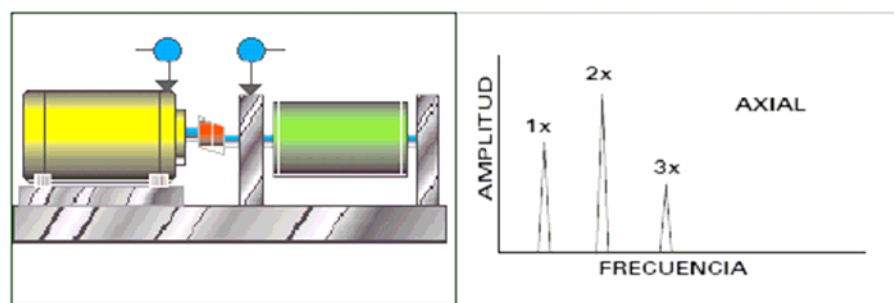


Figura 25: Espectro relacionado con desalineación.

Alinear el conjunto para corregir el defecto. Debe emplearse una técnica de alineación adecuada.

SOLTURA ESTRUCTURAL:

Soltura o desplazamiento del pedestal de la máquina por holguras en los pernos de la base o por deterioro de los componentes de la sujeción.

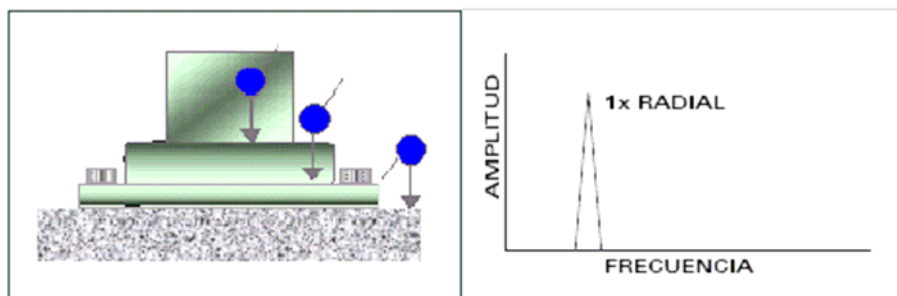


Figura 26: Espectro relacionado con soltura estructural.



Se recomienda primero revisar el estado de fatiga del pedestal de la máquina (rajaduras, corrosión). Luego debe verificarse el estado de los sujetadores y por último el estado de la cimentación.

ROTOR O EJE PANDEADO:

Más común en ejes largos. Se produce por esfuerzos excesivos en el eje.

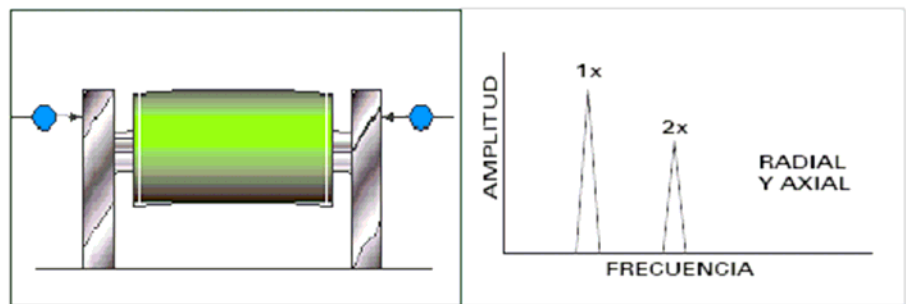


Figura 27: Espectro relacionado con deflexión de eje.

Para corregir la falla, el eje debe rectificarse o cambiarse.

RESONANCIAS Y PULSACIONES:

RESONANCIA: Ocurre cuando la velocidad de una fuerza conducida iguala la frecuencia natural de una estructura o una parte de ella.

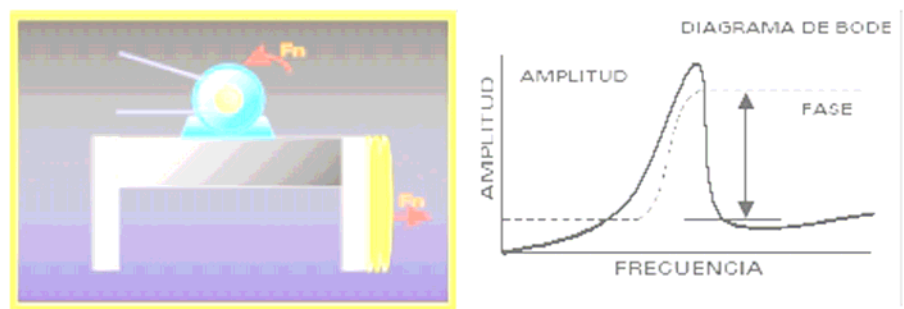


Figura 28: Espectro relacionado con la resonancia.

Se requieren cambios periódicos de localización de la frecuencia natural.



PULSACIONES: Sucede cuando una fuente de vibración interfiere con otra. Generalmente se produce por dos máquinas cercanas que trabajan casi a la misma velocidad.

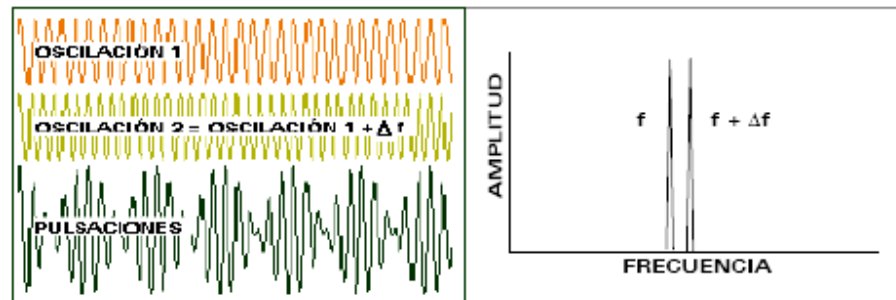


Figura 29: Espectro relacionado con pulsaciones de máquinas.

Para solucionar el problema se deben aislar estructuralmente las máquinas en conflicto.

FALLAS EN RODAMIENTOS:

FALLA EN PISTA INTERNA: Agrietamiento del material en la pista interna, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente.

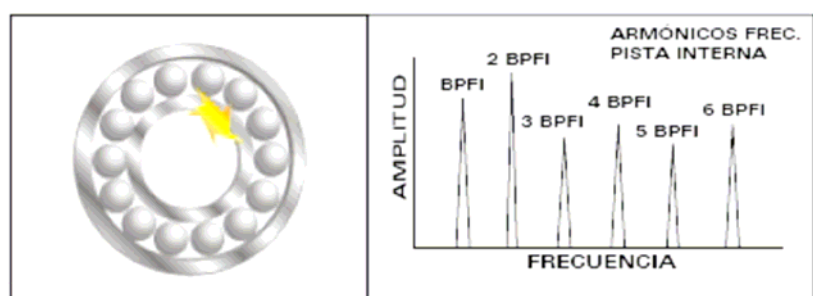


Figura 30: Espectro relacionado con defectos en rodamiento, pista interna.

El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Antes se debe revisar el estado de lubricación del rodamiento.



FALLA EN PISTA EXTERNA: Agrietamiento del material en la pista externa, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente.

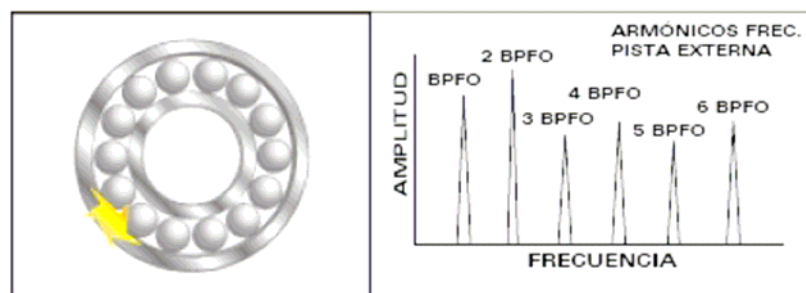


Figura 31: Espectro relacionado con defectos en rodamiento, pista externa.

El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Antes revise el estado de lubricación del rodamiento.

FALLA EN ELEMENTOS RODANTES: Agrietamiento del material en los elementos rodantes, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente.

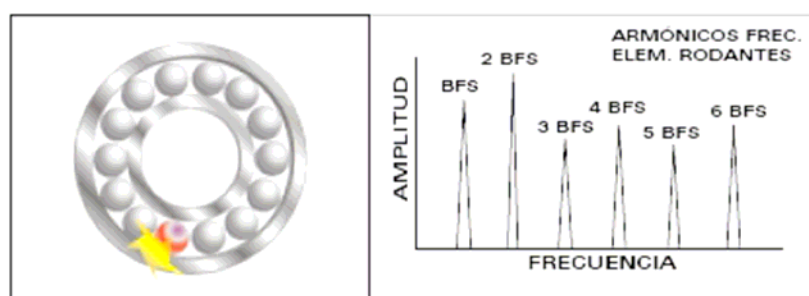


Figura 32: Espectro relacionado con defectos en rodamiento, elementos rodantes.

El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Antes revise el estado de lubricación del rodamiento.

Nota: Generalmente la medida más confiable es en dirección de la carga.

DETERIORO DE JAULA: Deformación de la jaula, caja o cubierta que mantiene en su posición a los elementos rodantes.

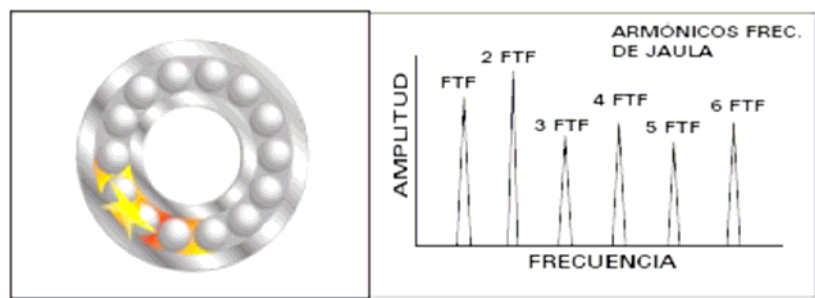


Figura 33: Espectro relacionado con defectos en rodamiento, jaula.

El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Revisar la posible causa que está dando origen a la falla.

III.2.5 Planificar corrección y ejecución de las tareas:

Ordenes de trabajo y retroalimentación:

Una vez realizado el diagnóstico de un problema, se emite una orden de trabajo en la que conviene especificar el nombre del equipo, la anomalía detectada y la intervención que debe realizarse, así como un código de prioridad de la intervención.

La corrección de los fallos detectados, una vez encontrado el problema y analizada sus causas, es necesario estudiar las acciones a realizar para solucionarlo, a la vez que buscar el momento adecuado para su reparación, intentando que esta sea lo más eficiente y eficaz posible y que afecte de forma mínima el proceso de producción, aprovechando para ello una parada o una situación en la que la carga de trabajo para la máquina sea menor que en otras.

Generación de avisos y toma de decisiones:

La información obtenida del sistema, deberá estar al alcance de todo el personal encargado de la operación y mantenimiento de la planta. La toma de decisiones oportuna marcará la gran diferencia que hay entre: que una avería progrese, su reparación sea costosa y se convierta en un riesgo para la operación del equipo o proceso, o que se actúe con rapidez, para evitar que la avería o averías avancen y se logre ahorrar grandes cantidades de recursos, tanto económicos, materiales como humanos.



III.2.6 Control de calidad y registro

Tras la ejecución del trabajo es muy importante la retroalimentación del sistema, que consiste en comprobar el estado de los elementos o partes del equipo sustituidas y hacer una medición posterior a la reparación para evaluar si cumple con los límites establecidos. De no cumplir se debe realizar un nuevo análisis, siguiendo el proceso anterior hasta lograr el estado de operación normal. Registrar los resultados y realizar inspección según corresponda.

A manera de resumen se muestran los pasos a seguir para el diagnóstico vibro-eléctrico de los motores en la figura siguiente:

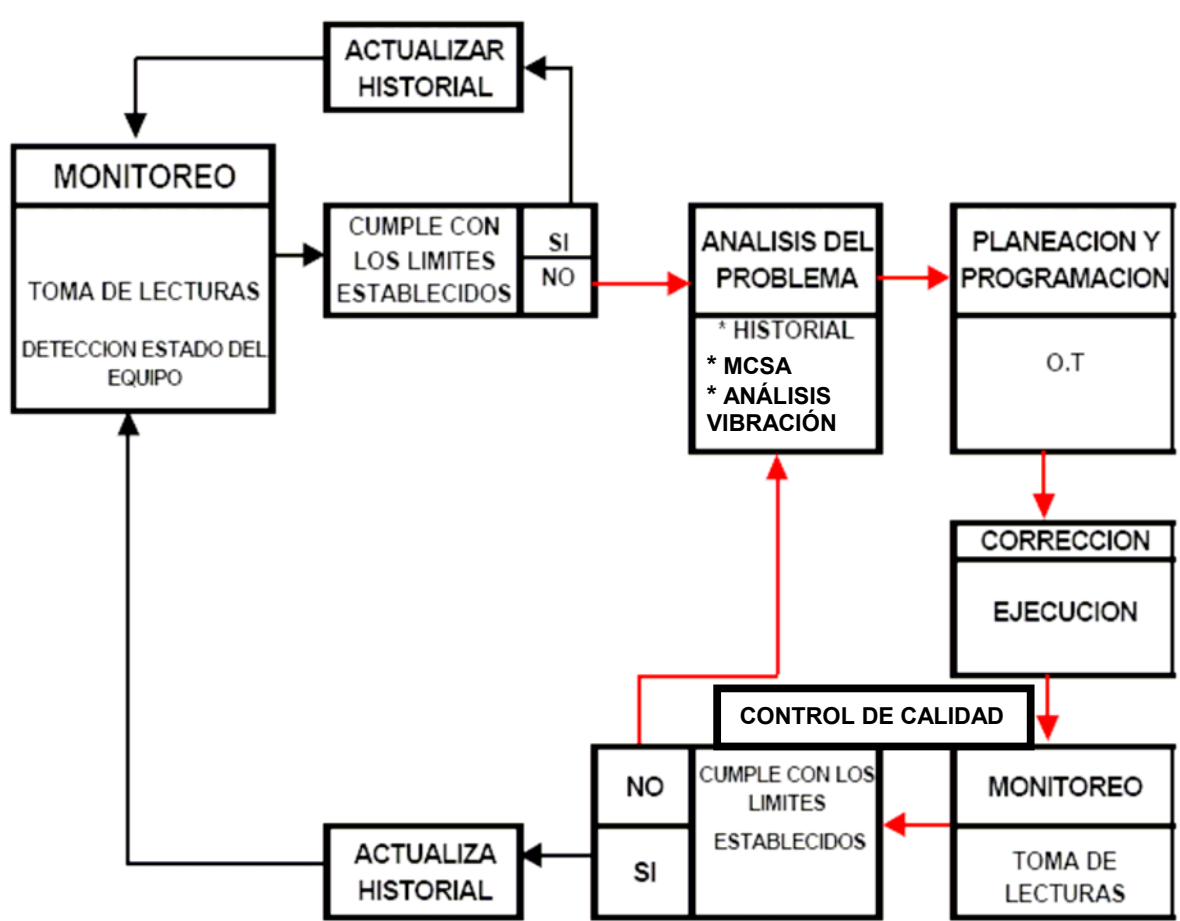


Figura 34: Algoritmo de la metodología de diagnóstico.



III.3 Ensayos experimentales

El experimento consiste en la aplicación práctica de la metodología de diagnóstico a varios motores de la empresa Che Guevara. El diagnóstico utilizando las técnicas de análisis espectral se realizó con motor en funcionamiento mostrando su validez y ventaja respecto a las utilizadas actualmente. Se eligieron motores de diferentes velocidades y potencias. De las muchas pruebas realizadas se eligieron tres ejemplos a manera de exposición de los ejercicios experimentales.

Como primera muestra, se cita el ensayo realizado en el motor del ventilador 405C de la planta de Recuperación de Amoniaco el cual presentó altos niveles de vibraciones críticos para su funcionamiento.

Este motor de 40 Kw de potencia, 3575 rpm se encuentra acoplado a un ventilador 2.5m³/h de capacidad que tiene como función la extracción de los gases amoniacales de todos los recipientes de la planta con una capacidad de, los cuales pasan por una cortina de agua provocando su condensación.

Existen cuatro series y un ventilador por cada una. La avería en uno de ellos afecta el proceso productivo en un 25 % con las consiguientes pérdidas de producción.

A continuación haciendo uso de la metodología de diagnóstico propuesta fue posible identificar y evaluar las causas del mal estado técnico del motor cumpliéndose el objetivo fundamental de este trabajo.

Paso1: Medición de la intensidad vibratoria del motor y evaluación del estado técnico.

Como primer paso se realizó la adquisición de los datos de vibraciones en la zona más cercana de los rodamientos. Se midieron mediante el analizador/colector de datos Microlog de la firma SKF los niveles de vibraciones del motor y el software PRISM2. El espectro de vibración medido en RMS mostró un nivel de 16.3 mm/s en el punto dos en la dirección axial y 17.2 mm/s en el punto dos horizontal. Estas mediciones se realizaron durante el funcionamiento normal del motor acoplado al ventilador.

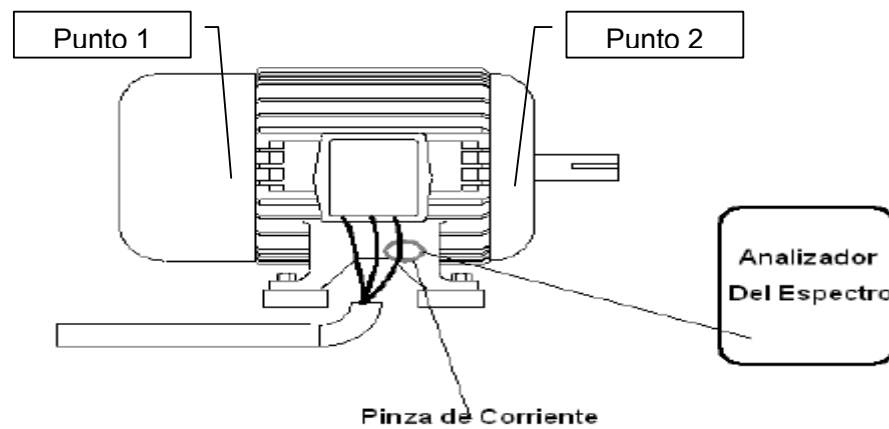


Figura 35: Puntos de medición niveles vibración y espectro de corriente.

Estos niveles de vibraciones resultan críticos para el funcionamiento del motor, los cuales deben estar según la norma ISO-2372 por debajo de los 4.5 mm/s, el motor presenta estado técnico malo.

Paso 2: Análisis frecuencial de las vibraciones y detección presencia de problemas eléctricos:

Este paso es importante, del mismo pueden depender los siguientes. En este caso al analizar los espectros de vibraciones no se observan la presencia de los picos de frecuencias asociados a los problemas de naturaleza eléctrica, es decir, no aparecen las frecuencias de red, la de los pasos de los polos y ni otros relacionados. Entonces el análisis debe encaminarse a identificar problemas mecánicos.

Este análisis permite evitarnos el engorroso trabajo de realizar el análisis espectral de corriente debido a los cálculos que se deben realizar.

El espectro se muestra a continuación:

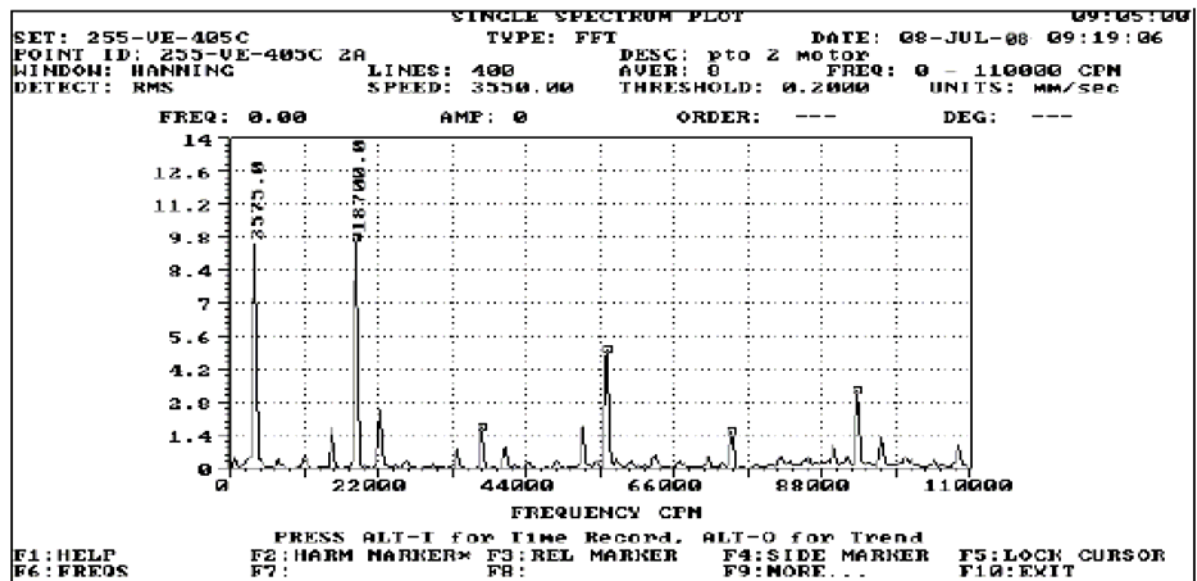


Figura 36: Espectro de vibraciones tomado en punto dos axial del motor del VE-405C.

Paso 3: Diagnosticar y evaluar los problemas eléctricos mediante el Análisis de Señal de Corriente en Motores eléctricos (MCSA)

Como los problemas son de naturaleza mecánica no es necesario realizar este paso, de todas maneras se muestra el espectro de corriente del motor confirmando el estado eléctrico del mismo.

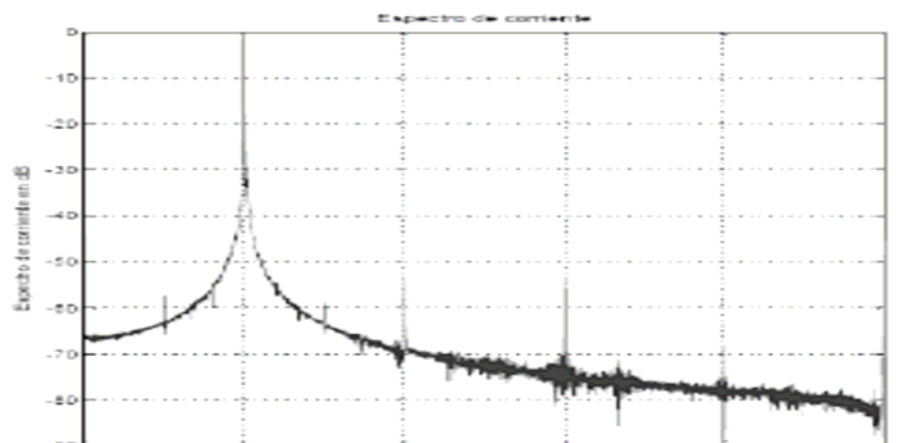


Figura 37: Espectro de corriente tomado en el motor del VE-405C.

Del gráfico anterior se establece que el estado del motor con respecto a los desperfectos eléctricos mencionados anteriormente es muy bueno.



Paso 4: Identificar y evaluar los problemas mecánicos mediante análisis de vibraciones.

Al realizar el análisis de vibraciones puede observarse que el comportamiento del espectro corresponde con los espectros típicos de defectos en los rodamientos, en este caso el rodamiento del lado del acoplamiento del motor muestra a través del gráfico la frecuencia de defecto de los rodillos (BSF) y varias armónicas de la misma acompañadas por bandas laterales a la velocidad de rotación (1xRPM) en la dirección axial. Este rodamiento es el NU-314 de la firma SKF y el cálculo de frecuencia de los defectos coincide con el de los rodillos.

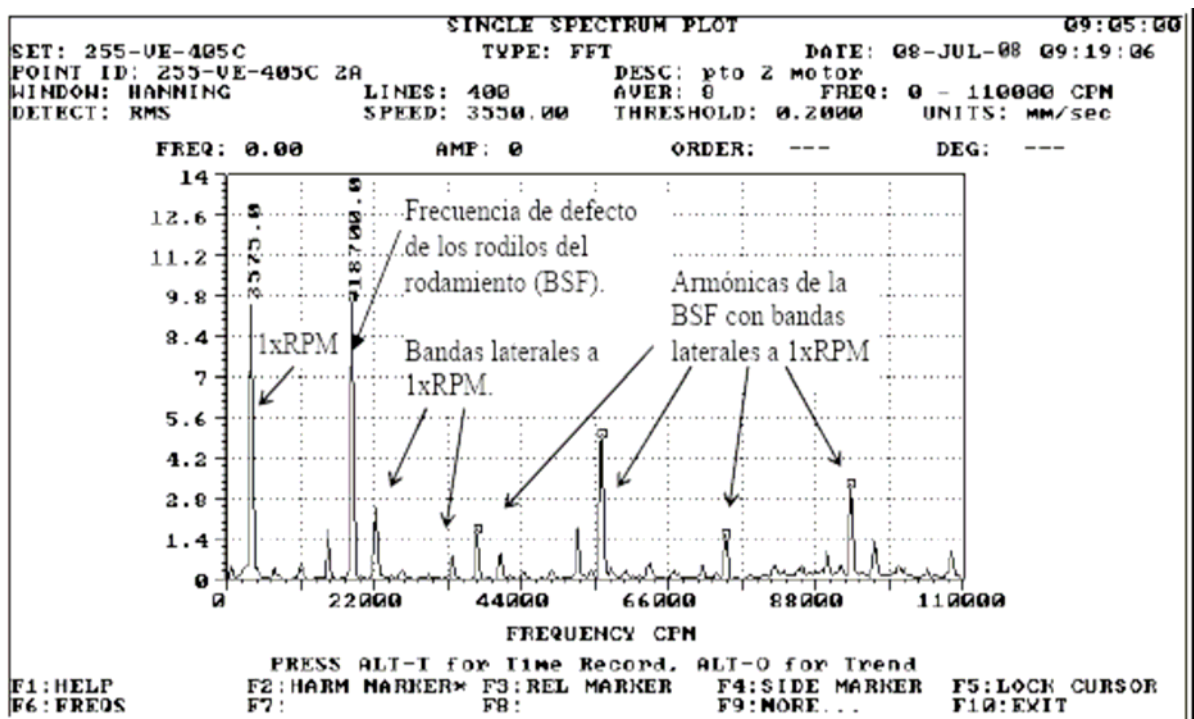


Figura 38: Análisis de las frecuencia del espectro de vibraciones en el motor del VE-405C.

En la gráfica siguiente se muestra el espectro tomado en el punto dos en la dirección horizontal, en este se observa claramente la frecuencia de los rodillos y sus armónicas:

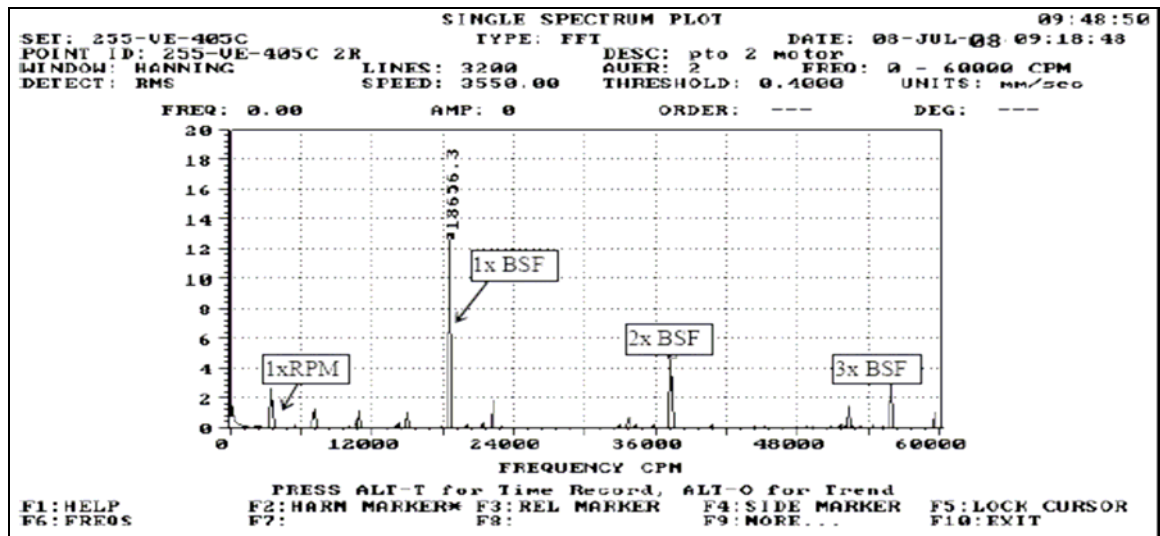


Figura 39: Espectro tomado en punto dos horizontal del motor del VE-405C.

El rodamiento se encuentra en un estado avanzado de falla. Es necesaria su sustitución en el menor tiempo posible para evitar una avería catastrófica.

Paso 5: Planificar corrección y ejecución de las tareas:

Una vez diagnosticado el fallo en el rodamiento, se emitió una orden de servicio en la que se especificó el nombre del equipo, la anomalía detectada y la intervención que debe realizarse, así como el código de prioridad M para esta intervención.

La información obtenida del sistema, estuvo al alcance de todo el personal encargado de la operación y mantenimiento del equipo.

La corrección se realizó en el momento más adecuado, de la forma más eficiente y eficaz posible, con afectación mínima al proceso de producción, ya que se aprovechó para ello una parada en la carga de trabajo del ventilador.

Paso 6: Control de calidad y registro.

Tras la ejecución del trabajo es importante la retroalimentación, se comprobó el estado de los elementos sustituidos mediante la medición nuevamente de los valores de



vibraciones posterior a la reparación, observándose niveles aceptables para la operación del motor. Al evaluar el estado técnico cumple con los límites establecidos.

Los espectros se muestran a continuación en la dirección axial y horizontal respectivamente. Se observa en los mismos la ausencia de los defectos diagnosticados, así como niveles buenos de vibración.

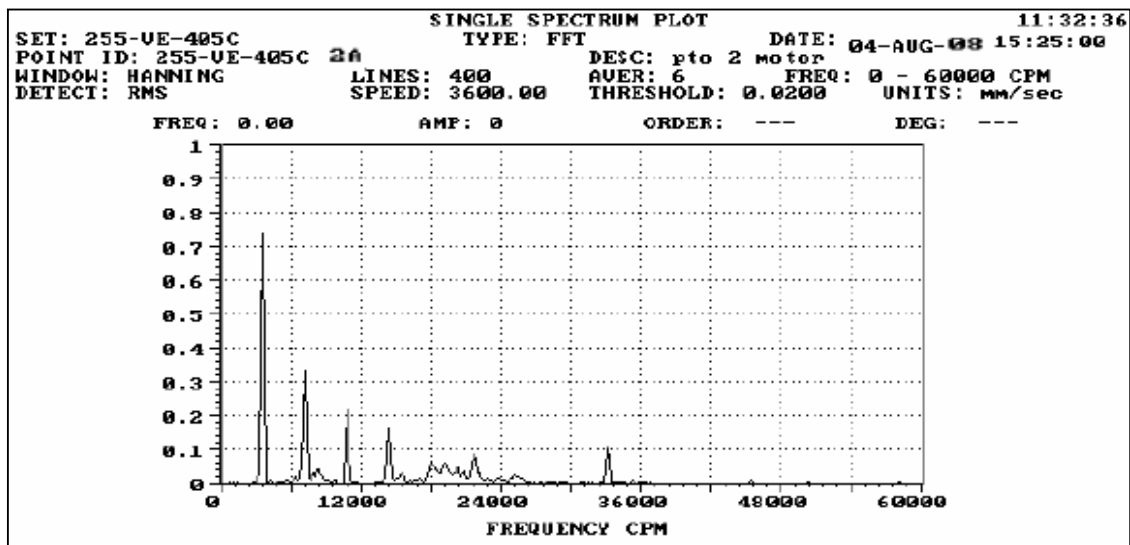


Figura 40: Espectro tomado en punto dos axial del motor del VE-405C después de la reparación.

La toma de decisiones oportuna marcará la gran diferencia que hay entre: que una avería progrese, su reparación sea costosa y se convierta en un riesgo para la operación del equipo o proceso, o que se actúe con rapidez, para evitar que la avería o averías avancen y se logre ahorrar grandes cantidades de recursos, tanto económicos, materiales como humanos.

Los análisis presentados anteriormente reflejaron la situación del motor, pudiéndose realizar un diagnóstico general del mismo en relación a los fallos más típicos que pueden suceder, los cuales fueron identificados y tipificados previamente.

Segundo experimento:

Se expone de forma más resumida otro ensayo realizado a un motor de la planta de Calcinación y Sínter, de 160 Kw de potencia y 1185 rpm. Este ventilador tiene la función de extraer los gases del calcinador, pasar por el electrofiltro y enviarlo a la chimenea. Una avería en el mismo afecta la producción en un 50%.

La adquisición de datos fue tomada debido a un ruido existente en el motor, lo cual indicaba un estado técnico no aceptable. El equipo colector/analizador de datos utilizado fue el modelo Vibxpert de la firma alemana PRUFTECHNIK y el software OMNITREND.

En la figura se observa un espectro medido en el plano radial del cojinete lado del coupling. En el mismo existe la presencia de una componente muy bien definida a una frecuencia de 120 Hz, asociada a la frecuencia de red, sugiriendo la existencia de problemas eléctricos, se puede observar también que las frecuencias asociadas a problemas mecánicos se encuentran en niveles aceptables.

El análisis infiere que el diagnóstico debe encaminarse al análisis de defectos eléctricos.

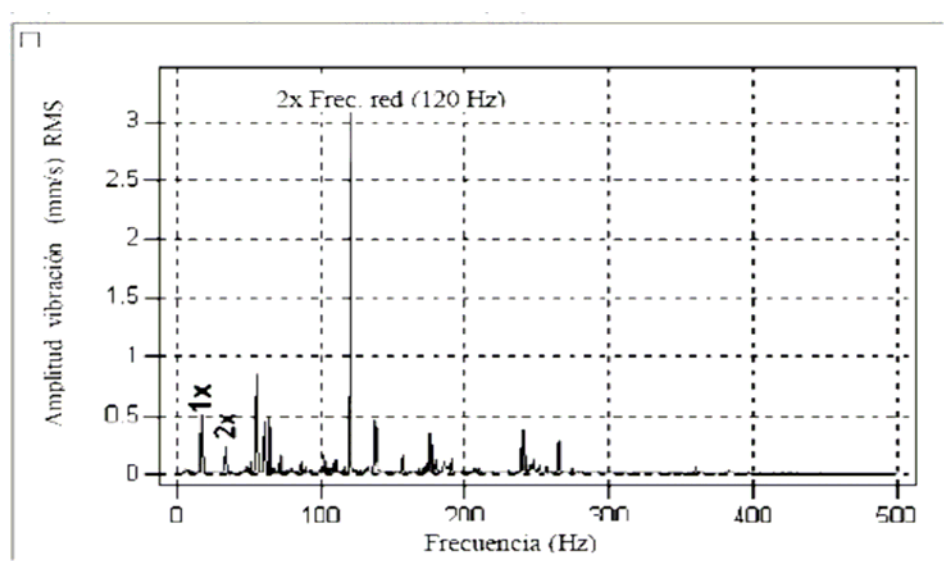


Figura 41: Espectro de vibración.

El espectro de corriente mostró un incremento de las bandas laterales alrededor de la frecuencia de red.

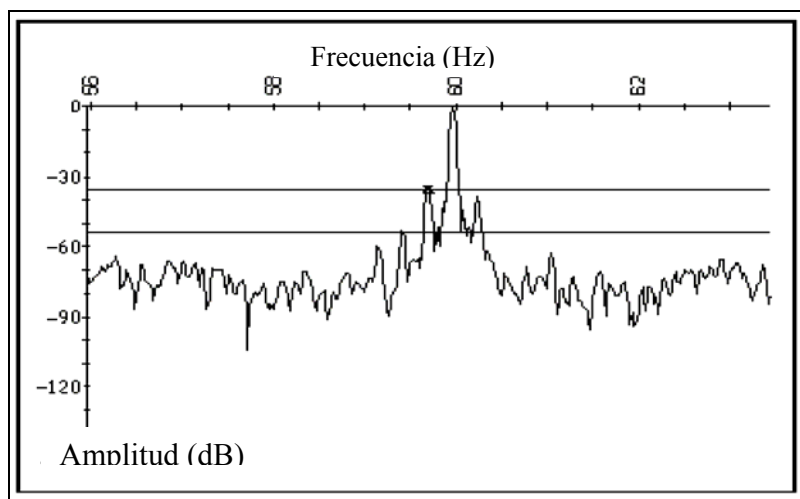


Figura 42: Espectro de corriente.

Al realizar el análisis de la señal de corriente del motor se diagnosticó defecto en las barras del rotor. Al evaluar el estado del rotor por la tabla de criterios, existen varias barras agrietadas o rotas, por lo que la acción recomendada es reparar.

El motor fue enviado al taller de reparaciones, donde fue desarmado. En inspección visual se pudieron observar varias barras con roturas, alrededor del 50 %. Fue determinado como causa raíz la mala unión entre las barras y los anillos de una reparación anterior.

Tercer experimento:

Otro ejemplo del empleo de la metodología se realizó en la bomba 222 A de la planta de Lixiviación y Lavado, la cual tenía un Mantenimiento Preventivo Planificado (MPP).

Se realizó un diagnóstico del mismo. A continuación se muestra el espectro tomado.

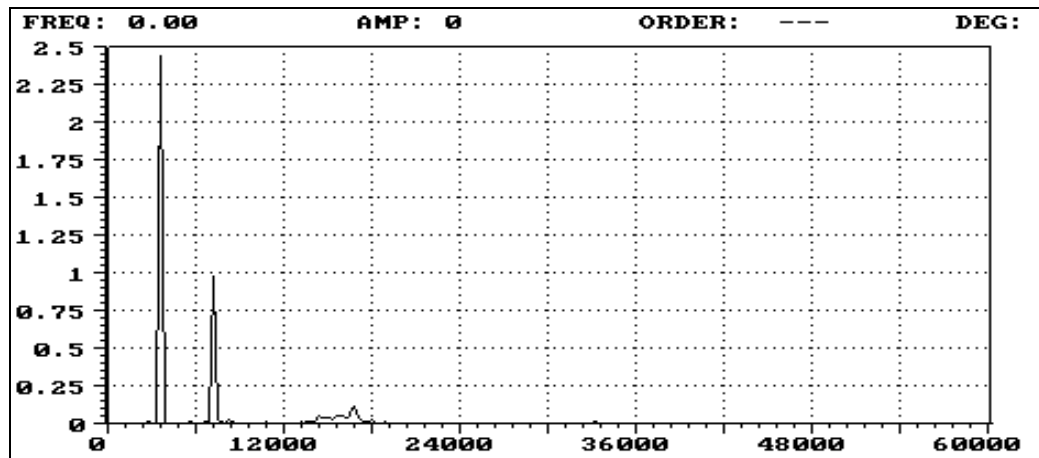


Figura 43: Espectro tomado en el motor de la bomba 222 A.

En este caso se muestran niveles de vibraciones aceptables, no se observan picos relacionados con problemas eléctricos. Por lo tanto el motor se encuentra en óptimas condiciones para su operación y el cumplimiento de sus funciones, significa que no es necesario planificar acciones correctivas y sí registrar los valores para referencias futuras.

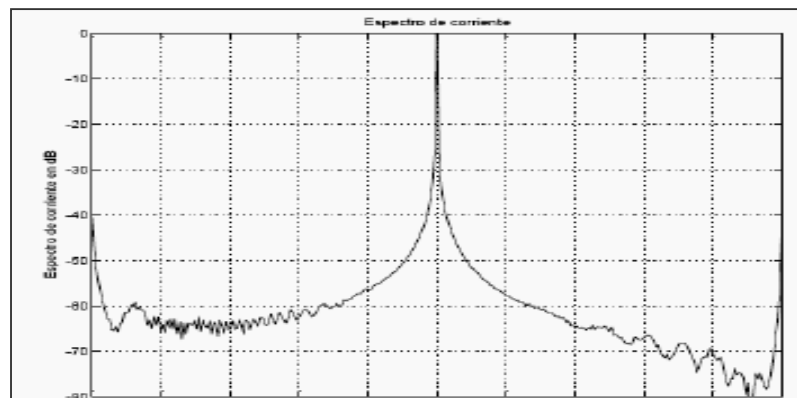


Figura 44: Espectro de corriente.

El espectro de corriente no mostró bandas laterales alrededor de la componente de 60Hz, confirmando la no existencia de problemas eléctricos. De esta forma se manifiesta una vez más la utilidad de la metodología ya que evita la realización de mantenimiento innecesario.



III.4 Análisis y discusión de los resultados

Los ensayos realizados arrojaron resultados alentadores que permiten confiar en que la metodología presentada puede ser realizada sin mayores inconvenientes, cumpliéndose de esta forma con los objetivos del proyecto, pudiéndose establecer un servicio de diagnóstico para motores de inducción de jaula de ardilla, de cierta calidad a un costo reducido.

Los experimentos fueron realizados en motores de diferentes velocidades de rotación y potencias, haciendo un poco más diverso el empleo de la metodología, confirmando la generalidad de la misma.

El funcionamiento de las máquinas eléctricas siempre ha sido objeto de estudios y supervisiones continuas. Tradicionalmente se han empleado técnicas que, con el correr de los años, se han vuelto sumamente confiables. Sin embargo, la mayoría de ellas exige que las máquinas se hallen fuera de servicio para poder realizar el diagnóstico.

En la actualidad se vislumbra la posibilidad de efectuar diagnósticos on-line, es decir, en servicio normal y con técnicas no invasivas. Las ventajas de estas nuevas alternativas radican, por un lado, en que la supervisión continua del motor presenta mayores posibilidades de detectar a tiempo fallos de rápida evolución.

Las técnicas tradicionales aún siguen empleándose, sin embargo, la rápida evolución de las nuevas técnicas y el gran interés en ellas por parte de investigadores de todo el mundo y de responsables de mantenimiento de grandes industrias permiten augurarles un futuro promisorio.

Si bien aún no es posible establecer comparaciones entre los beneficios económicos de aplicar técnicas tradicionales o las nuevas, es importante destacar que estas últimas involucran equipos de bajo coste y su implementación es posible sin grandes inversiones prácticamente en todos los casos.



Existen muy diversas herramientas para detectar y diagnosticar fallos en máquinas de inducción. La aplicación de cada técnica en particular queda sujeta a la información que pueda adquirirse desde el motor (corrientes, tensiones). Cada técnica ofrece ventajas y desventajas en función del fallo a detectar, la información requerida para el diagnóstico y el tipo de carga aplicada al motor.

La técnica basada en el estudio del espectro de frecuencias de las corrientes de estator presenta la ventaja de su fácil implementación en la mayoría de los casos porque con sólo una pinza amperimétrica es posible medir la corriente de una fase cualquiera del motor y disponer de la información necesaria para el diagnóstico.

Esta técnica resulta muy efectiva para la detección de barras rotas en el rotor. En efecto, las bandas laterales que se presentan para tal fallo alrededor de la frecuencia de red, permiten identificar fácilmente una situación anormal. Es importante destacar que el diagnóstico debe realizarse con el motor funcionando al menos con la mitad de su carga nominal y resulta más efectivo cuanto mayor es la carga del motor. Un cortocircuito en el estator de una máquina de inducción puede ser detectado, asimismo, mediante la aplicación de esta técnica.

Los fallos en pistas o bolas de los rodamientos, debe tenerse en cuenta que para este tipo de fallo, la técnica basada en el análisis de vibraciones del motor ha sido ampliamente empleada durante décadas con resultados fiables.

CONCLUSIONES PARCIALES

Dos de las principales técnicas de detección de fallos en máquinas de inducción han sido presentadas y combinadas haciendo más completo el diagnóstico en un motor de inducción. En este caso se puede hacer un diagnóstico electro-mecánico lo que posibilita descartar la naturaleza de los problemas.



La frecuencia con la que debe efectuarse el diagnóstico, por su parte, depende básicamente de los fallos que se pretenden detectar. En efecto, fallos tales como fisuras en barras del rotor presentan generalmente una evolución muy lenta mientras que otras como cortocircuitos en el estator pueden evolucionar muy rápidamente.

Es aconsejable realizar mediciones periódicas y comparar los resultados. En efecto, el análisis del espectro de frecuencias del estator, por ejemplo, resulta efectivo si se comparan los niveles armónicos con los obtenidos con el motor funcionando libre de fallos.

Los métodos no invasivos de detección de fallos han evolucionado con rapidez durante los últimos años y la tendencia indica que su aplicación práctica continuará incrementándose. En la actualidad, un importante número de investigaciones se hallan en desarrollo de nuevas alternativas en este campo y en algunas empresas se han comenzado a implementar los diagnóstico basados en algunas de las técnicas.



CAPITULO IV. VALORACIÓN TÉCNICO - ECONÓMICA Y AMBIENTAL



IV-1 Introducción

Abordar el mantenimiento sin algún tipo de estrategia ni organización, limitándose a reparar daños producidos o realizando la gama de mantenimiento preventivo recomendada por el fabricante de los equipos, es una forma no muy eficiente de hacer mantenimiento en el mundo de hoy, por tal motivo en instalaciones críticas el mantenimiento basado en condición cobra un papel primordial.

Aparece entonces la necesidad de abordar el mantenimiento como una herramienta de valor dentro del proceso productivo, tratando de eliminar costes en la ejecución del mismo sin perder su finalidad, que es la explotación del medio a mantener, el mayor tiempo posible y con el menor costo.

IV-2 Valoración técnica-económica

Las fallas en equipos críticos conducen a pérdidas económicas considerables a nivel de la industria ocasionando interrupciones en la producción durante el lapso de tiempo de una reparación costosa o en el peor de los casos hasta que el equipo sea sustituido, lo cual agrava la situación cuando no se cuenta con un reemplazo inmediato de un equipo costoso.

Un motor trabajando en forma ineficiente aumenta el consumo de energía eléctrica de manera innecesaria y desproporcionada. Si esta condición se multiplica por el número total de motores eléctricos que intervienen en un proceso de producción y que tienen problemas de eficiencia, se encuentra ante un problema de facturación excesiva e innecesaria de energía eléctrica, con un considerable aumento en los costos de producción.

La justificación técnica se evidencia al comparar las actuaciones que se realiza cuando se efectúa un mantenimiento preventivo o correctivo en nuestras instalaciones con las que se tendría que realizar cuando se tiene monitorizadas nuestras máquinas, realizando un seguimiento de los parámetros a medir.



Las actuaciones del diagnóstico pasan por unos inconvenientes iniciales de elevados costes de inversión en tecnología y formación, con una rentabilidad de la misma a medio y largo plazo.

Pero las ventajas son evidentes:

- Se conoce el estado del motor en todo instante.
- Se detectan prácticamente todas las averías.
- Solo se para o interviene en el motor cuando realmente es necesario.
- Se puede conocer el daño en los componentes desde una fase inicial del mismo, permitiendo programar su sustitución en el momento más conveniente.
- Al intervenir en el motor se conoce el problema, reduciendo el tiempo de parada por reparación.
- Reducir las piezas del almacén, adquiriéndolas cuando se detecta el problema en una fase primaria.
- Incrementar la seguridad del personal y operación de las plantas.

La rentabilidad económica de las actuaciones de la metodología de diagnóstico podrán demostrarse con datos numéricos reales de nuestra empresa cuando sea establecida en la Empresa. La evaluación de esta rentabilidad no es sencilla, es necesario disponer de una información histórica, aunque siempre será posible la estimación del coste directo evitado.

Estimación de coste evitado

A manera de ejemplo hacemos una comparación de la aplicación del Mantenimiento Preventivo Planificado (MPP) y la Metodología de Diagnóstico Espectral (MDE) tomando uno de los ventiladores de los experimentos realizados.



Análisis económico de la ocurrencia de un fallo imprevisto en el motor y su inevitable afectación a la producción.

En este caso el VE-203 de la planta de Calcinación, presente en los ensayos experimentales provoca su parada una afectación del 50% a la producción de la planta y por tanto del producto final. Un fallo imprevisto en el motor puede demorar aproximadamente seis horas en ponerlo en operación nuevamente, pero se necesita alrededor de cuatro horas más para estabilizar el sistema y el mineral tiene que ser reprocesado.

Teniendo en cuenta que el calcinador procesa 12 tn de carbonato por hora lo que equivale a 2,5 tn/h de óxido, 2.1 tn/h de Sínter (producto final). Las pérdidas de producción en esas seis horas es de 12,6 toneladas, con el precio del níquel en este periodo de 5.42 \$/lb, la afectación costaría 150 242,4 CUC.

Sin embargo, aplicando la metodología de diagnóstico se realiza un análisis del estado técnico evitando el fallo imprevisto del mismo y planificando de manera eficiente el cambio. Al planificar el paro y tener las tareas coordinadas, el cambio puede realizarse en dos horas, ahorrando cuatro horas y provocando menos desestabilización al sistema ya que se potencia de forma ordenada el otro calcinador y no es necesario realizar el reproceso.

Sólo por concepto de disminuir el tiempo de parada del ventilador en cuatro horas, se afecta la producción en 4.2 tn, lo que representa 50 080.8 CUC, es decir, un tercio del fallo imprevisto. El análisis da un ahorro de 100 161,6 CUC, alrededor de 66%.

El costo de la instrumentación ya adquirida es de 20 000 CUC, lo que significa que con sólo haber evitado la avería imprevista en este motor se recuperó la inversión realizada con creces.



Valoración del ensayo realizado en la bomba 222A de Lixiviación

A continuación se realiza una comparación entre el MPP de la bomba y el uso de la Metodología de Diagnostico Espectral. La bomba tenía planificado un MPP de 4 horas. Se realizó la aplicación de la metodología y se diagnosticó estado técnico bueno, por lo que no era necesaria su intervención. La operación de la bomba no fue interrumpida.

Tipo Mtto.	Periodicidad	Tiempo parada equipo	Duración	Costo MO	Tareas a realizar
MPP Revisión	2160 h (3meses)	4 h	4h	Mec. A \$8.88 Ayudante \$4.16	Revisión: motor, fijación, guardera, alineación, lubricación, tornillos y tuercas, acoplamiento.
MDE	Mensual	--	10 min.	Téc. Mtto. Ind. \$0.55	Medición de vibraciones con lo que se puede detectar: ➤ Desbalance. ➤ Desalineamiento. ➤ Estado del rodamiento. ➤ Problemas eléctricos. ➤ Otras.

Podemos observar que el Mantenimiento Preventivo Planificado cada tres meses realiza una inspección de 4 horas de duración, con la consiguiente parada del equipo y utilización de un mecánico A (\$8.88) y un ayudante (\$4.16) costando la inspección de revisión \$13.04.

Con la metodología de diagnóstico se realizarían en esos tres meses, una por cada mes, lo que da una medida de mayor seguridad y confiabilidad de operación, con una duración mensual de 10 minutos y trimestral de media hora, sin parada del equipo, por un técnico a un costo de \$1.65.

Como puede apreciarse a simple vista mientras que se gasta \$13.04 en MPP cada tres meses, con sus correspondientes desventajas; con la MDE, junto con sus incuestionables ventajas, sólo se gasta \$1.65 lo que constituye un ahorro de \$11.39 que representa un 85%.



Para salvar las diferencias de los métodos tradicionales de mantenimiento y respondiendo a las necesidades de:

- Reducción de costes
- Aumento de la seguridad sobre el funcionamiento de los equipos

se configura la necesidad de una metodología que permita una vigilancia continua de las máquinas especialmente aquellas que son críticas a la producción.

La metodología tiene como objetivo final asegurar el correcto funcionamiento de las máquinas críticas a través de la vigilancia continua de los análisis espectrales, indicadores de su condición y que se ejecuta sin necesidad de recurrir a desmontajes y revisiones periódicas.

Teniendo en cuenta el nivel de ejecución e instrumentación, consideramos que la implantación de esta metodología con todas las ventajas inherentes que comporta, es una realidad incuestionable que tarde o temprano habrá que abordar si queremos poner nuestra industria al nivel competitivo que las condiciones actuales están exigiendo ya.

IV-3 Impacto ambiental

Actualmente existe un concepto desarrollado y aplicado a nivel internacional, se trata de la llamada Producción Más Limpia, conocida por sus siglas PML. Estas palabras significan ante todo, un cambio en la mentalidad y actitud, apunta en la aplicación desde el principio mismo de cualquier labor una estrategia ambiental preventiva, capaz de reducir los riesgos al ser humano y al medio ambiente.

El mantenimiento desempeña un papel determinante en la gestión de la PML de cualquier organización, sus resultados deciden sobre aspectos relevantes de esta como son: seguridad, calidad, costos, medio ambiente, competitividad, etcétera. El mantenimiento como acción, desde el punto de vista medioambiental, constituye una vía para prevenir impactos, garantizando la fiabilidad de los equipos y reduciendo el riesgo de ocurrencia de accidentes catastróficos, tales como incendios, explosiones,



emisiones de sustancias tóxicas, etc. Y es una fuente de contaminación porque en su ejecución produce desechos peligrosos (sólidos, líquidos y gaseosos).

El efecto ecológico del mantenimiento se garantiza mediante la gestión eficaz de este y su mejoramiento continuo dentro de un sistema de gestión medioambiental y significa que todos los aspectos medioambientales estén bajo control operacional y se hayan tomado todas las medidas para prevenir y corregir impactos.

En este trabajo pueden analizarse las vibraciones como factor de riesgo y los parámetros del proceso que pueden influir en la elevación de sus niveles. Es importante su control pues las vibraciones no sólo afectan el estado técnico de los motores, sino también el estado de salud del ser humano, debido a que propagan ondas que provocan cambios de presión en el aire afectando la membrana del tímpano del oído y otros órganos.

En cualquier medio (aire, tierra o agua) y en cualquier campo (industria, agricultura, etc.) el hombre está continuamente expuesto a vibraciones que interfieren en su comodidad, eficiencia en el trabajo y en algunos casos, incluso en su salud y seguridad, estas pueden ser:

- Vibraciones transmitidas simultáneamente a toda la superficie del cuerpo o a una parte considerable de él. Por ejemplo, las vibraciones producidas por un sonido de intensidad muy alta.
- Vibraciones transmitidas al cuerpo a través de su superficie soporte. A este tipo de vibraciones corresponden las de un vehículo, edificios, equipos, etc.
- Vibraciones aplicadas a una parte determinada del cuerpo.

De manera general, las acciones dirigidas a prevenir los riesgos de impacto medioambiental desde el punto de vista del mantenimiento, deben estar dirigidas al personal, los equipos, al proceso y sus interrelaciones.



Acciones dirigidas al personal

Las acciones dirigidas al personal deben estar encaminadas a la educación medioambiental, promover nuevas conductas y aptitudes hacia el medio ambiente, esta labor formativa debe estar integrada a los planes de formación y adiestramiento del personal de mantenimiento.

Acciones dirigidas a los equipos

La aplicación de técnicas de análisis de fiabilidad (análisis del modo de fallo, de criticidad, análisis del árbol lógico) para conocer el estado del equipo y garantizar su disponibilidad. Para ello se requiere buenos registros de datos y mantenimientos que faciliten identificar los problemas repetitivos y predecir los de mayor impacto.

La metodología de diagnóstico resulta una herramienta efectiva en la optimización del mantenimiento, porque permite identificar y planificar las acciones a ejecutar en los equipos y en el momento oportuno. Esto permite disminuir desechos y con ello fuentes potenciales de contaminación.

Acciones dirigidas al mantenimiento

- Identificar las acciones de mantenimiento a ejecutar con riesgos de impacto, identificar y evaluar los aspectos ambientales asociados a ellas.
- Identificar los procesos que pueden ser mejorados o cambiados por tecnologías más limpias y eficientes. Establecer programa para evaluación técnico-económica de alternativas y su introducción.
- Establecer procedimientos escritos para regular la conducta ambiental del personal de mantenimiento durante la ejecución de los trabajos y ante situaciones anormales. Establecer planes de contingencias.
- Identificar y establecer los puntos de control y medición en el proceso para evaluar el desempeño ambiental durante la realización de los trabajos. Recolección de datos, tomas de muestras y observaciones. Análisis y comunicación de los resultados. Mejora de los procesos.
- Procedimientos para la recepción de los trabajos. Realizar análisis comparativos del estado de los equipos antes y después del mantenimiento.



Análisis y mejoras de los procesos

En la gestión del mantenimiento integrada a una sistema de gestión medioambiental para asegurar su efecto, deben ser bien definidas las interrelaciones con otras funciones importantes, como la Calidad, la Seguridad para producir la sinergia necesaria que asegure una mayor fiabilidad y efectividad a las acciones relativas al medio ambiente que sean tomadas.

Durante la realización de las inspecciones y metodología de diagnóstico deben observarse las siguientes reglas:

1. Coordinar y obtener autorización del jefe de mantenimiento de la planta y de seguridad industrial, para realizar cualquier operación.
2. Observar y cumplir todas las medidas de seguridad e higiene del trabajo establecidas en la planta donde se realice el diagnóstico.
3. El técnico de mantenimiento que realizará la inspección se hará acompañar por algún personal de mantenimiento de la planta.
4. Como las mediciones se realizan con el equipo en operación, tomar todas las medidas de precaución antes y durante la colocación de los sensores.
5. Chequeo y seguimiento del equipamiento para garantizar que los ruidos emitidos durante su operación (vibraciones) no sobrepasen las normativas establecidas.
6. Establecer acciones proactivas mediante procedimientos documentados para la eliminación de las causas que originan los impactos medioambientales.



CONCLUSIONES

1. Se estableció una metodología para el diagnóstico vibro-eléctrico de motores de inducción jaula de ardilla, combinando el análisis espectral de vibraciones y el de corriente.
2. Fueron combinadas dos de las principales técnicas de detección de fallos en máquinas de inducción haciendo más completo el diagnóstico en un motor de inducción.
3. Se identificó y diagnosticó problemas electromecánicos en los motores de inducción tipo jaula de ardilla con esta metodología.
4. Se validó una metodología para el establecimiento futuro de un programa de mantenimiento predictivo al poderse monitorear y aplicar las técnicas de análisis espectral en el mismo contexto operacional.
5. Este trabajo puede convertirse en una poderosa herramienta para los analistas de vibraciones que llevan a cabo el mantenimiento predictivo en nuestras empresas.



RECOMENDACIONES

1. Generalizar esta metodología para el diagnóstico vibro-eléctrico de los motores de inducción del tipo jaula de ardilla en la Empresa Che Guevara.
2. Establecer un sistema de mantenimiento predictivo a los motores de inducción para obtener un funcionamiento más seguro y fiable de los mismos.
3. Utilizar la metodología como criterio de evaluación de los trabajos de reparación que realizan los terceros.
4. Proponer a la dirección de mantenimiento de la empresa una evaluación de las técnicas expuestas anteriormente con las que se aplican actualmente.
5. Proponer la valoración y aplicación de esta metodología a nivel nacional por los analistas de vibraciones que se dedican al mantenimiento predictivo.
6. Realizar mediciones periódicas y comparar los resultados. El análisis de los espectros resulta efectivo si se comparan los niveles armónicos con los obtenidos con el motor funcionando libre de fallos.
7. Seguir el desarrollo de los métodos no invasivos de detección de fallos ya que están evolucionado con rapidez durante los últimos años y la tendencia indica que su aplicación práctica continuará incrementándose.
8. Efectuar la frecuencia del diagnóstico en dependencia de los fallos que se pretenden detectar.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



- [1] Dr. Evelio Palomino Marín “Elementos de Medición y Análisis de Vibraciones en Máquinas Rotatorias”, Quinta edición, Julio. 2007. pp. 145.
- [2] Motor Reliability Working Group, “Report of large motor reliability survey of industrial and comercial installations Part I, and II,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 21-4, pp. 853-872, July-Aug. 1985.
- [3] M. Fernández, M. García, G.A. Orcajo, J. Cano, J. Solares. Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas. Barcelona. Marcombo, 1998. Pg.121- 153.
- [4] R.M. Talam, S.B. Lee, G. Stone, G.B. Kliman, J. Yoo, T.G. Habetler, R.G. Harley. “A Survey of methods for detection of stator related faults in induction machines”, The IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2003, Atlanta, USA. Agosto de 2003. pp. 35- 46.
- [5] M. García, M. Fernández, C. Rojas, G.A. Orcajo, J. Cano, J. Solares. “Study of an induction motor working under stator winding inter-turn short circuit condition”, The IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2003, Atlanta, USA. Agosto de 2003. pp. 52- 57.
- [6] F.C. Trutt, J. Sottile, J.L. Kohler. “Detection of A.C. machine winding deterioration using electrically excited vibrations”. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 37. 2001. pp. 10-13.
- [7] A. Stavrou, H. Sedding, J. Penman. “Current monitoring for detecting inter-turn short circuits in induction motors.” IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 16. 2001. pp. 32-37.



- [8] D. Valencia, N. Muñoz. El flujo axial de dispersión como indicador del estado del aislamiento de los devanados de los motores de inducción. Tesis de grado Universidad de Antioquia. Medellín. Julio de 2003.
- [9] M. Arkan, D. Kostic-Perovic, P.J. Unsworth. "Modelling and simulation of induction motors with inter-turn faults for diagnostics". Electric Power Research. Vol. 75. 2005. pp. 57-66.
- [10] R.P. Leger, W.J. Garland, W.F.S. Poehlman. "Fault detection and diagnosis using statistical control charts and artificial neural networks." Artificial intelligence in engineering. Vol. 12. 1998. pp. 35-47.
- [11] Stevenson W.D. Análisis de sistemas eléctricos de potencia. México. McGraw-Hill. 1979. pp. 270-298.
- [12] "Introducción, definición y clasificación de las vibraciones. Obtenido en WWW.monografias.com, Agosto 2007.
- [13] Tutorial de Vibraciones para Mantenimiento Mecánico. Realizado por A-MAQ S.A Análisis de Maquinaria. Enero 2005. WWW.a-maq.com
- [14] "Diagnóstico del aislamiento estático en motores de inducción mediante la medición del flujo axial de dispersión" Revista Facultad de Ingeniería N:32 pp.102-103. Diciembre 2004. Fernando Villada, Diego A. Valencia, Nicolas Muñoz
- [15] Dr.Evelio Palomino Marín "Elementos de Medición y Análisis de Vibraciones en Máquinas Rotatorias", Quinta edición, Julio. 2007. pp. 114-134.
- [16] "Spectrum Interpretation" obtenido en <http://www.vibrationschool.com/landing.htm> en Enero 2008.



- [17] "Diagnóstico de máquinas" Obtenido en <http://www.dliengineering.com/vibman-spanish/glennspanol-index> Octubre del 2007
- [18] W. T. Thomson and M. Fenger, "Current signature analysis to detect induction motor faults," IEEE Industry Applications Magazine, vol. 4, pp. 26-34, July-Aug 2001.
- [19] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, And P. Vas, "AI Techniques in Induction Machines Diagnosis Including the Speed Ripple Effect," IEEE Trans. On Ind. Applications, vol. 34, pp. 98-108, Jan.-Feb 1998.
- [20] R. Schoen and T. Habetler, "Effects of Time-Varying Loads on Rotor Fault Detection in Induction Machines," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31-44, pp. 900-906, July/August 1995.
- [21] W. T. Thomson, D. Rankin, D. Dorrell, "On-line current monitoring to diagnose airgap eccentricity in large three-phase induction motors-industrial case histories verify the predictions," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14-4, pp. 1372– 1378, Dec. 1999.
- [22] R. Schoen, T. G. Habetler, F. Kamran, and R. G. Bartheld, "Motor Bearing Damage Detection Using Stator Currents Monitoring," IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 31-6, pp. 1274-1279, Nov.-Dec. 1995.
- [23] "Condition Monitorin and Fault Diagnosis of Electrical Motors"- A Review Subhasis Nandi, Member, IEEE, Hmid A. Toliyat, Senior Member, IEEE and Xiaodong Li, Student Member, IEEE. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL.20, No.4 December 2005
- [24] "MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS TO DETECT FAULTS IN INDUCTION MOTOR DRIVES—FUNDAMENTALS, DATA INTERPRETATION, AND INDUSTRIAL CASE HISTORIES" by William T. Thomson Director and Consultant EM



Diagnostics Ltd. Alford, Aberdeenshire, Scotland and Ronald J. Gilmore Discipline Technical Authority (Electrical Engineering) AMEC Upstream Oil & Gas Nigg, Aberdeen, Scotland

[25] “Mantenimiento predictivo en motores eléctricos (parte 5)” ElectroMagazine - La revista del sector eléctrico del Uruguay, No. 13 Julio 2005

[26] “IMPACTO ECONOMICO DEL ANÁLISIS PREDICTIVO DE MOTORES Y GENERADORES ELÉCTRICOS EN LA INDUSTRIA” Ing. Marvin Bustillo, BSEE, Universidad de Costa Rica. Especialista en Análisis de Motores Eléctricos, Gerente División Eléctrica, TERMOGRAM Consultores.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- “APPLICATIONS FOR MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS” Howard W. Penrose, Ph.D. General Manager, ALL-TEST Pro, A Division of BJM Corp, Old Saybrook, Connecticut, 2000
- “Motor Testing” Which Road Will You Take?” Dave Humphrey, Allison Transmission Indianapolis, IN, 2000
- “MOTOR CIRCUIT ANALYSIS FOR ENERGY, RELIABILITY AND PRODUCTION COST IMPROVEMENTS” Howard W. Penrose, Ph.D, On behalf of ALL-TESTPro, LLC, Old Saybrook, CT, 2002
- “Motor Current Signature Analysis” by Mike Johnson DLI ENGINEERING CORPORATION, 2005



- “Practical Motor Current Signature Analysis Taking the Mystery Out of MCSA” Dr. Howard W Penrose, Ph.D. General Manager, ALL-TEST Pro, A Division of BJM Corp Old Saybrook, CT 06475, 2005
- “Test Methods for Determining the Impact of Motor Condition on Motor, Efficiency and Reliability” Dr Howard W. Penrose, Ph.D ALL-TEST Pro, LLC Old Saybrook, CT 06475, 2005
- Case Study – “Motor current signature analysis” Obtenido: Octubre de 2007, en http://www.aptgroupp.com.au:80/elec_case.html
- “Identifying Motor Defects Through, Fault Zone Analysis” By Noah P. Bethel Obtenido: noviembre de 2007 en: <http://www.pdma.com/oldart.html>
- “Motor Current Signature Análisis”, Obtenido: octubre de 2007 en: <http://equipmenthealth.com/mcsa.htm> Last modified: January 26, 2007
- “SHORT COURSE “MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSISFOR DIAGNOSIS OF FAULTS IN INDUCTION MOTOR DRIVES”, Prof Bill Thomson, Director and Consultant EM Diagnostics Ltd. Presentación de Power Point, 2006
- “Estudio del comportamiento de motores de inducción ante fallas estatóricas” Fernando Villada Duque*, Diego Parra, Guillermo Ocampo, Grupo de Investigación en Manejo Eficiente de la Energía Eléctrica —GIMEL—, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. (Recibido el 23 de junio de 2006. Aceptado el 29 de octubre de 2006). Revista Facultad de Ingeniería No. 40. pp. 76-94. Junio, 2007
- “DETECCIÓN DE FALLAS EN MOTORES DE INDUCCIÓN POR MEDIO DEL VECTOR DE PARK” Carlos Verucchi, Esteban Gelso, Marcos Peñalva, Gerardo



Acosta Departamento de Ingeniería Electromecánica – Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, 2003

- “ALCANCES DE LA IMPLEMENTACION DE NUEVAS TECNICAS DE ANALISIS EN LOS PROGRAMAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO – PROACTIVO EN LA INDUSTRIA” Edgar A. Estupiñan P. Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad de Tarapacá eestupin@uta.cl Dirección Postal : Casilla 6-D, Arica - CHILE, Pedro N. Saavedra G. Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción - CHILE
- “Análisis de las zonas de falla de Motores Eléctricos” Ing. Juan C. Hidalgo B., MBA, Especialista en termografía Nivel II y en análisis de fallas en motores eléctricos, Grupo TERMOGRAM, San José, Costa Rica, 2005
- “INTRODUCCIÓN AL MANTENIMIENTO PREDICTIVO” Antonio Ordóñez Guerrero Universidad de Sevilla – Escuela Universitaria Politécnica c/Virgen de África nº 7, 41011 SEVILLA (ESPAÑA) -Marzo 2006
- “Electrical Motor Diagnostics for Generators” Part 1 – The Basics ALL-TEST Pro, LLC, Reliabilityweb.com - A Culture of Reliability 01.11.2006
- E. Wiedenbrug, “On-line and off-line state of the art preventive maintenance of electrical motors,” in Proc. 2001 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference. Pp. 627–634.
- E. Wiedenbrug E, G. Frey and J. Wilson, “Impulse testing as a predictive maintenance tool,” in Proc. 2003 4th IEEE Conversional Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, pp. 13-19.



- P. J. McCully and C. F. Landy, “Evaluation of current and vibration signals for squirrel cage induction motor condition monitoring,” in Proc. 1997 Eighth ☐onversión☐al Conference on Electrical Machines and Drives, pp. 331–335
- “Análisis de las Zonas de Falla de Motores Eléctricos” Ing. Juan C. Hidalgo B., MBA Grupo TERMOGRAM, San José, Costa Rica, 2007
- “AC Electric Motor Frequencies” obtenido en Marzo del 2008 en el sitio de SKF, <http://is.aptitudexchange.com/engcalc/CalcMotorACFrequencies.do>
- Fernando Villada, Diego R. Cadavid “Diagnóstico de Fallas en Motores de Inducción mediante la Aplicación de Redes Neuronales Artificiales” Departamento Eléctrica, Universidad de Antioquia, Información Tecnológica – Vol. 18 N° 2 – 2007
- C. J. Verucchi y G. G. Acosta “Técnicas de Detección y Diagnóstico de Fallos en Máquinas Eléctricas de Inducción” Senior Member IEEE 2003 SDEMPED Symposium for Electric Machines
- Castelli, M. Andrade, M. “Metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos de inducción” URUMAN 2007, Montevideo-Uruguay
- Mike Johnson “Motor Current Signature Analysis”, DLI ENGINEERING CORPORATION, 2007.
- Juan C. Hidalgo B. “La importancia de la correlación de las tecnologías predictivas en el diagnóstico de motores eléctricos” 1er Congreso Mexicano Confiabilidad y Mantenimiento, Oct 30-31, 2003
- “Cuadros de diagnóstico y corrección de fallas” obtenido en http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_2363_cuadro_de_diagnostic, octubre de 2005