



INSTITUTO SUPERIOR MINERO
METALURGICO DE MOA
DR. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ

Ingeniería Eléctrica
Facultad: Metalurgia
Electromecánica

Trabajo de Diploma

En opción al Título de

Ingeniero Eléctrico.

Título: Diagnóstico de fallas de excentricidad en motores de inducción por el espectro de frecuencia de la corriente del estator.

Autor: Omar de la Cruz Hernández

Tutores:

Moa, Holguín

Junio del 2016
“Año 58 de la Revolución”



DECLARACION DE AUTORIDAD

Yo Omar de la Cruz Hernández certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero- Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes, educativos e investigativos.

Para que así conste firmamos la presente a los ____ días del mes de ____ del año_____

Omar de la Cruz Hernández
Diplomante

Tutor



AGRADECIMIENTOS

A mis padres por sus consejos y bendiciones, cada herramienta y cada enseñanza que me han dado me ha permitido desarrollarme y ser mejor persona cada día.

A mis familiares y amigos que han estado pendientes de mí, dando su apoyo aun sin pedírselo.

A mis profesores por compartir sus conocimientos y experiencias.

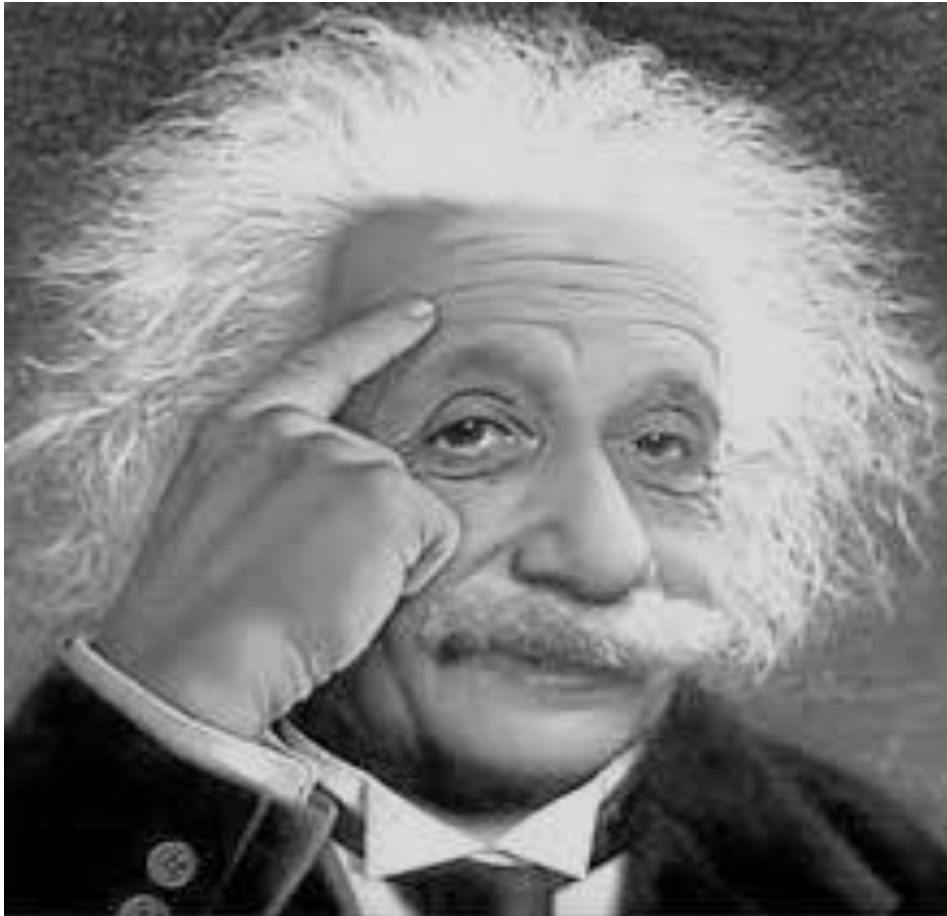
Quiero agradecer de forma muy especial a todas las personas que de una o de otra forma me brindaron de su apoyo, paciencia y consejos para terminar de forma exitosa este proyecto.



DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres por haberme brindado la dirección adecuada para formarme espiritual, humana y profesionalmente, a mis hermanos, familiares, amigos y a quienes en todo momento me dieron su confianza y apoyo, valores que me impulsaron para finalizar una etapa más de mi carrera profesional.

PENSAMIENTO



Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.

Albert Einstein.



Resumen

A nivel industrial se utilizan varios métodos en el diagnóstico de fallas en el motor de inducción, sin embargo, no abarcan la totalidad de las mismas. Este trabajo realiza un estudio, para evaluar utilizando la técnica frecuencial mediante los espectros de las corrientes en el estator del motor de inducción, fallas de excentricidades, que no pueden ser determinadas por los métodos tradicionales utilizados en el diagnóstico de fallas a nivel industrial.

Se obtiene el espectro de frecuencia para la falla mencionada anteriormente de algunos motores que se averían en la planta de lixiviación de la empresa Che Guevara. Se desarrolla una aplicación en MATLAB para utilizar el método de análisis espectral de corriente en el estator a través de la Transformada de Fourier (FFT). El trabajo presenta un resumen de los resultados en la aplicación del método a varios motores seleccionados previamente, concluyendo que es un método efectivo en el diagnóstico de este tipo de falla en el motor de inducción a nivel industrial.



SUMMARY

At industrial level use several methods in the diagnosis of faults in the motor of induction, however not hatch the totality of the same thing. This work exposes, after a study, a methodology to evaluate by using the technical frecuencial by means of the specters of the currents in the stator of the motor of induction, judge as breakages of bars of the rotor and eccentricities, which cannot be certain for the traditional methods used in the diagnosis of faults at industrial level.

It obtains to him the specter of frequency for each type of fault mentioned previously of some motors that damaged to him in a certain mining-metallurgical plant of Moa silk, and this would serves as base to elaborate the model predictive of the motor of induction.

An application in MATLAB is developed to use the method of spectrum analysis of current in the stator through the transformed of Fourier (FFT). The work presents a summaries of the results in the application of the method to several motors selected previously, by concluding that it is an effective method in the diagnosis of these types of faults in the from induction to level industrial motor.



Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. Introducción.	4
1.2. Trabajos precedentes.	4
1.3. Motores Eléctricos de Inducción	6
1.4. Clasificación del tipo de fallas.....	7
1.4.1. Fallas Mecánicas.....	8
1.4.2. Fallas eléctricas.....	12
1.4.3. Fallas de enlace de potencia.....	15
1.5. Métodos de diagnóstico en los motores de inducción	18
1.6. Conclusiones del capítulo	24
CAPÍTULO 2. MÉTODO DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS POR ESPECTRO DE FRECUENCIA.....	25
2.1. Introducción	25
2.2. Método de diagnóstico por espectro de frecuencia de la corriente del estator	25
2.3. Metodología de diagnóstico por espectro de frecuencia de la corriente del estator de los motores de inducción	26
2.4. Conclusiones Parciales.....	37
CAPÍTULO 3: VALORACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICO Y AMBIENTAL.....	39
3.1. Introducción	39
3.2. Valoración técnica-económica.....	39
3.3. Estimación de coste evitado	40
3.4. Impacto ambiental	42
3.5. Análisis y mejoras de los procesos.....	44



3.6. Conclusiones Parciales.....	44
CONCLUSIONES GENERALES.....	45
RECOMENDACIONES	46
BIBLIOGRAFÍA	47
ANEXOS	49



INTRODUCCIÓN GENERAL

El Motor de Inducción es una de las formas más conveniente de obtener energía mecánica a partir de energía eléctrica. Por ello son ampliamente utilizados en la industria. Actualmente en el mundo, el 60% de la producción mundial de energía es consumida por los motores eléctricos, se tienen incontables ejemplos de su aplicación en la industria, el comercio, los servicios y el hogar. Los motores de inducción trifásicos son los más utilizados, pues representan el 90% de los motores eléctricos existentes.

En las condiciones de explotación de la planta de lixiviación, los motores de inducción no se encuentran exentos de fallas causadas por, esfuerzos eléctricos, mecánicos, térmicos o ambientales. Debido a esto es necesario contar con una unidad de detección y localización de fallas, con el objetivo de prevenir o evitar daños al motor o al proceso y de esta forma considerar acciones de mantenimiento, reconfiguración o acomodación al sistema en caso de ser posible.

En los Motores de Inducción, durante el funcionamiento se presentan fallas que no son susceptibles de detección por simple inspección o mediciones y pruebas de corrientes, el hecho es que numerosas razones pueden causar fallas en un motor. La aparición de excentricidades es bastante frecuente en las máquinas eléctricas rotativas, ya que hay que conseguir una perfecta alineación entre los centros del rotor y estator, así como garantizar la perfecta redondez de ambos elementos. La excentricidad en las máquinas de inducción, al someterlas al trabajo continuo puede derivar en efectos tales como, incrementos en las pulsaciones del par, disminución del par medio, el aumento de las pérdidas, entre otras. Esto puede reducir considerablemente la eficiencia de la máquina y producir excesivos calentamientos, que en consecuencia pueden llegar a ocasionar el fallo definitivo en dicha máquina, ocasionando un paro de la producción, si esta falla no es atendida, se puede originar un rápido deterioro del devanado, las cuales reducen el tiempo de vida útil del motor de inducción, finalizando con un reemplazo del mismo.



Problema de investigación

La necesidad de obtener un método de diagnóstico de fallas de excentricidad en motores de inducción que operan en condiciones de explotación en la planta de lixiviación de la Empresa Che Guevara.

Objetivo General

Realizar el diagnóstico de fallas de excentricidad en motores de inducción usando el método del análisis espectral de la corriente en el estator, cuando los motores operan en condiciones de explotación.

Objetivos específicos

- Realizar un estudio de las principales fallas ocurrente en los motores de inducción en la planta de lixiviación de la ECG.
- Implementar el diagnóstico por espectro de frecuencia en el Motor de Inducción.
- Demostrar la validez del método propuesto a través de estudio del caso.

Objeto de investigación

Motores de inducción de la planta de lixiviación.

Campo de aplicación

Diagnóstico de los Motores de Inducción.

Hipótesis

Si se utiliza el método de análisis espectral de la corriente del estator es posible la identificación de la falla de excentricidad en motores de inducción, que operan en la planta de lixiviación de la ECG, que no es determinada por los métodos tradicionales de diagnóstico de fallas para el motor de inducción.



Tareas

- Realización del estado del arte sobre principales métodos de diagnóstico de fallas de excentricidad en motores de inducción.
- Realización de las mediciones de los motores seleccionados.
- Experimentación con motores defectuosos.
- Elaborar un modelo de falla de excentricidad en motores de inducción para su simulación en MATLAB.
- Análisis comparativo de los resultados.
- Valoración económica del trabajo.



CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.

1.1. 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 las industrias, 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 ambientales.

En este capítulo se desarrolla los aspectos teóricos que permiten entender las principales fallas existentes en un Motor de inducción, así como los métodos utilizados en el diagnóstico de las mismas.

El motor de inducción es uno de los equipos eléctricos de mayor aplicación en el ámbito industrial. Muchos de estos motores se utilizan en las industrias, 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 ambientales.

En este capítulo se desarrolla los aspectos teóricos que permiten entender las principales fallas existentes en un Motor de inducción, así como los métodos utilizados en el diagnóstico de las mismas.

1.2. Trabajos precedentes.

En su disertación doctoral 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 espectral de corriente. Piñol, Ortega y 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 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 análisis de señal de corriente del motor (MCSA).

En el trabajo desarrollado por Suponga (2006), 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.

Lores Suárez (2008), en su tesis de maestría elaboró una metodología a través de la compilación de datos para la detección precoz de fallos en los motores eléctricos mediante el diagnóstico vibro-eléctrico, en la misma realizó varios experimentos en motores de la empresa Ernesto Che Guevara logrando así espectros de vibraciones y espectros de frecuencia ya que 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.

Almira Montero (2009), muestra el análisis de las fallas más frecuentes ocurridas en el sistema eléctrico en la empresa Ernesto Che Guevara, donde se reflejan sus



debilidades mostrando los puntos más vulnerables a fallas, las de mayor frecuencia de aparición, las principales causas de aparición y los efectos que se generan a partir de ellas. Para dicho análisis se tiene en cuenta la cantidad de variables a analizar y el tipo para escoger el método estadístico más efectivo.

Fonseca Ramos (2009), realizó un estudio de las fallas en los motores de inducción de la planta de Calcinación y Sínter de la empresa Ernesto Che Guevara con el objetivo de proponer mejoras a través del estudio de las fallas más frecuentes ocurridas en los motores de inducción de dicha planta. La necesidad de lograr una estabilidad en los motores de inducción debido a la gran cantidad de fallas fue lo que motivó a la realización del estudio realizado por las pérdidas que ocasionan en la producción de níquel.

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. 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.

1.3. 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 figura 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.

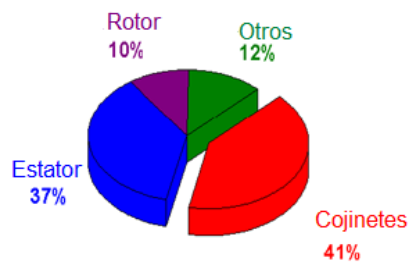


Figura 1.1: Estudio sobre las fuentes de falla en motores eléctricos

Para los motores, se han desarrollado variadas técnicas de diagnóstico, pero las más aplicadas son las que involucran análisis de vibraciones, análisis espectral de corriente, análisis del flujo axial de dispersión y las más recientes que combinan modelos de simulación del comportamiento de las fallas y la aplicación de redes neuronales artificiales para identificar las fallas entre espiras del estator.

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.

1.4. Clasificación del tipo de fallas

1. Fallas Mecánicas.
2. Fallas Eléctricas.
3. Fallas de enlace de potencia.



1.4.1. Fallas Mecánicas

Las fallas mecánicas se pueden dividir en tres partes.

1. Desbalance mecánico.
2. Fallas en los rodamientos.
3. Excentricidad.

1. Desbalance mecánico

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

Aglomeración desigual de polvo en los alabes de un ventilador, falta de homogeneidad en partes coladas, como burbujas, agujeros de soplado, y partes porosas, excentricidad del rotor, flexión de rodillos, especialmente en máquinas de papel, errores de máquina. (Defectos constructivos), distribución desigual en las barras de rotor de motores eléctricos o en el enrollado, erosión y corrosión desigual de las impulsoras de una bomba (Efecto de cavitación), pesos de balanceo que faltan, flecha con flexión.

El desbalance en un motor puede ser de tres tipos:

- a) Desbalance estático
- b) Desbalance en dos planos o tipo par.
- c) Desbalance por rotor colgante.

a). Desbalance Estático

Es un sobrepeso en una sección del rotor, se caracteriza porque la amplitud de la vibración se incrementa en proporción al cuadrado de la velocidad. En la señal de vibración por lo general domina la frecuencia a $1 \times \text{rps}$. Al realizarse las mediciones con los sensores colocados como se muestra en la figura 1.2, las señales están en fase.

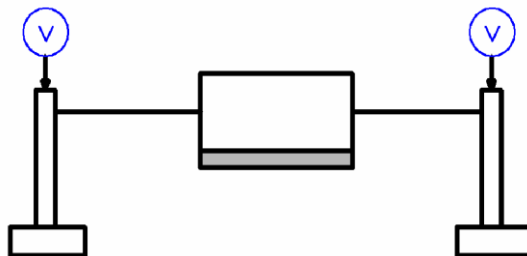


Figura 1.2. Desbalance de masa estático.

b). Desbalance en dos planos o tipo par

Son dos sobrepesos dispuestos en diferentes planos del rotor al igual que en el caso anterior la amplitud es proporcional al cuadrado de la velocidad, la diferencia es que las mediciones de los sensores de vibración están desfasadas 180° . Domina la frecuencia a 1x rps.

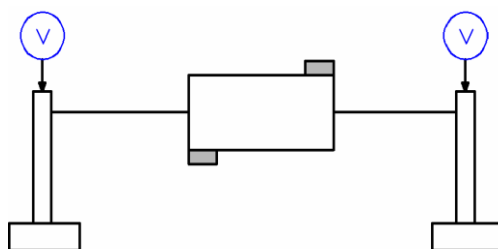


Figura 1.3. Desbalance de masa en dos planos.

c). Desbalance por rotor colgante.

Ocurre en rotores que se encuentran en el extremo de un eje. Se produce por desgaste en la superficie del rotor y doblamiento del eje. El espectro presenta vibración dominante a 1X rps del rotor, muy notoria en dirección axial y radial.

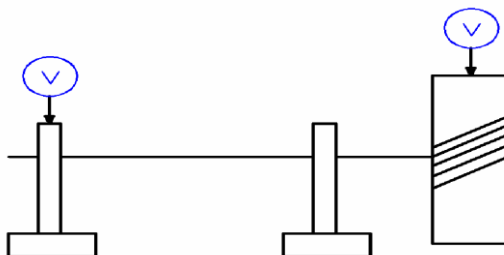


Figura 1.4. Desbalance por rotor colgante.



2. Fallas en los rodamientos

Las fallas en los rodamientos son las más comunes en los motores, se manifiestan por vibraciones de alta frecuencia, que pueden ser de hasta 12 x sin embargo a medida que el daño es mayor las frecuencias van disminuyendo. Una vez detectada la falla el rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Entre las causas comunes de fallas en los rodamientos podemos encontrar a: Carga excesiva, falta de alineamiento, defectos de asientos del eje y/o de las perforaciones en el alojamiento, montaje defectuoso, ajuste incorrecto, lubricación inadecuada o incorrecta, sellado deficiente, falsa brinelación (Deformación bajo carga).

3. Excentricidad

La excentricidad es otra causa común de vibración en una máquina rotativa. La excentricidad se produce cuando la línea central del eje no es la misma que la línea central del rotor, el centro de rotación verdadero difiere de la línea central geométrica.

Existen tres Tipos de Excentricidades:

- a) Excentricidad de tipo estática.
- b) Excentricidad de tipo dinámica
- c) Excentricidad combinada estática - dinámica.

a). Excentricidad de tipo estática

La excentricidad estática se presenta cuando el entrehierro presenta un valor mínimo en una posición espacial fija, es decir, durante todo el giro del rotor existe siempre un punto en el que el entrehierro es mínimo y otro en el que es máximo. Este tipo de excentricidad esta ocasionado por una forma oval del alojamiento estatórica o por una ubicación incorrecta del rotor dentro del estator como se indica en la figura 1.5.

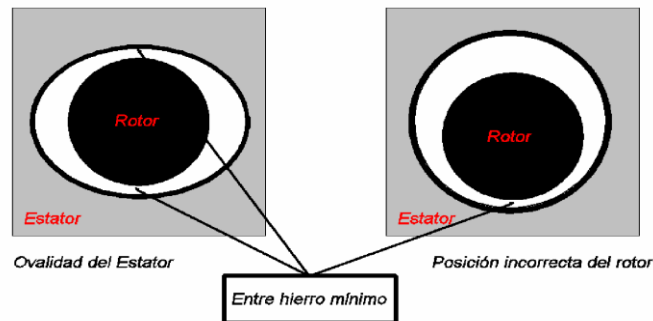


Figura 1.5. Forma de producirse la excentricidad estática.

b). Excentricidad de tipo dinámica

Cuando el entrehierro presenta un valor mínimo que varía en el tiempo y en el espacio (al considerar el giro de la máquina) la excentricidad se denomina dinámica. Este tipo de excentricidad puede estar causado por la rotación del eje alrededor de un punto que no es su centro geométrico o por la existencia de un rotor deformado que presente una sección ovalada. En la figura 1.6 se puede observar este tipo de excentricidad.

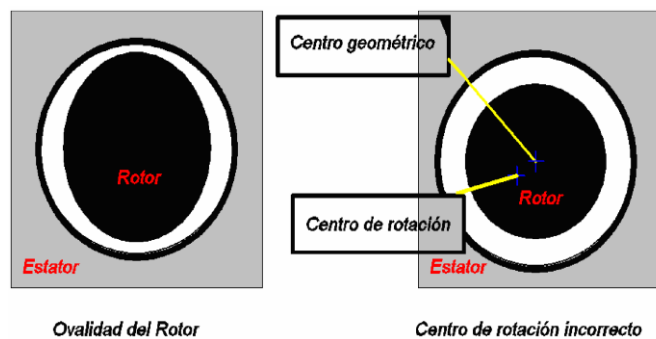


Figura 1.6. Forma de producirse la excentricidad dinámica.

c). Excentricidad combinada estática – dinámica

En la práctica se presentan las dos excentricidades combinadas ya que es imposible fabricar rotores y estatores con una sección perfectamente circular, como lograr que el eje gire sin tolerancias en torno a su centro geométrico.

En la figura 1.7 se observa cómo se consigue que el rotor presente una combinación de excentricidades superponiendo un desplazamiento hacia la

derecha – excentricidad estática – con una rotación alrededor de un punto que no es el centro geométrico del rotor – excentricidad dinámica.

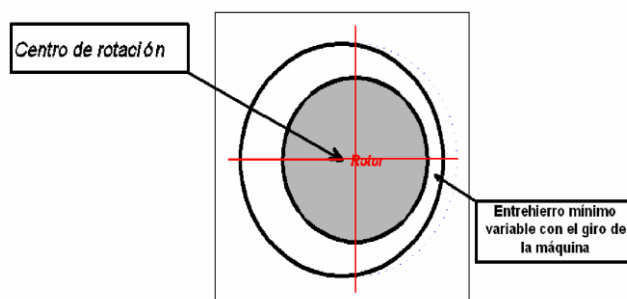


Figura 1.7. Combinación de excentricidad estática-dinámica.

La excentricidad puede causar daños en el motor debido al golpeteo entre el rotor y el estator, así como frecuencias inducidas por la combinación de excentricidades estática y dinámica en la corriente de alimentación de un motor de inducción.

1.4.2. Fallas eléctricas

Dentro de las fallas eléctricas podemos encontrar a:

- Fallas en la simetría de los bobinados del estator

Las fallas de la simetría de los bobinados se producen por defectos de construcción, este problema se da especialmente en motores que han sido rebobinados en talleres sin seguir todas las normas técnicas para realizar este tipo de trabajos. La asimetría de los bobinados produce pequeños campos magnéticos que giran en sentido contrario al campo magnético del estator, este efecto produce esfuerzos que son directamente proporcionales al cuadrado de la corriente, estos esfuerzos alcanzan su máximo valor en el momento de arranque del motor.

- Fallas en la simetría de los bobinados del rotor (Jaula).



Al igual que en el estator, la asimetría de las barras del rotor de un motor de inducción estas se deben a fallas constructivas, barras rotas o agrietadas y barras sueltas, que pueden propagarse a barras vecinas o dañar a los devanados del estator cuando se producen deformaciones, que también pueden afectar a las láminas de material ferromagnético que conforman el núcleo.

- Falla por desbalance de voltaje

El deterioro térmico del aislamiento en una fase del bobinado puede resultar de voltajes desbalanceados. Esto usualmente es causado por desbalances de cargas en el sistema eléctrico, conexiones deficientes en los terminales del motor o alta resistencia en contactos (presión insuficiente).

Nota: Un uno por ciento de desbalance de voltajes, puede resultar en un seis a diez por ciento de desbalance en las corrientes.

- Falla por pico de voltaje

Esta falla en el aislamiento es causada por picos de voltaje. Los picos de voltaje son frecuentemente el resultado de “switching” en los circuitos de potencia, descargas eléctricas (rayos), descarga de capacitores y los efectos de dispositivos de estado sólido tales como variadores de frecuencia.

- Ranuras del estator y ranuras del rotor

Las ranuras del estator como del rotor son agujeros los bordes de las láminas redondas y su conformación longitudinal es el resultado del apilamiento de láminas. Estas hojas delgadas son 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 en consecuencia existiera una distorsión térmica. Hojas en corto también causarán niveles de vibración más altos a 120 Hz. Por lo general cuando se repara un motor debe evitarse introducir objetos punzantes en las ranuras del estator que podrían comprometer el aislamiento de las láminas.

- Barras del rotor agrietadas o rotas



La presencia de roturas en las barras del rotor hace que la frecuencia de rotación del motor sea frecuencia igual al producto de la frecuencia de deslizamiento por el número de polos. Como consecuencia de este fallo, se produce un desbalance eléctrico en el motor, que da como resultado la generación de niveles de vibraciones suficientemente altos a la primera y segunda armónicas de la velocidad de rotación. Asimismo, la presencia de barras rotas o agrietadas e incluso la presencia de uniones con alta resistencia al paso de la corriente, pueden producir bandas laterales separadas a la frecuencia de paso de polos alrededor de las armónicas de la frecuencia de rotación, incluyendo $2x$, $3x$, $4x$ y hasta $5x$, todo lo cual es síntoma de problemas en más de una barra, ya que se tiene más de un pulso por vuelta del rotor. Sin embargo, la clave para identificar barras sueltas o abiertas la constituye la presencia de componentes a frecuencia más alta, tal es el caso de las componentes a la frecuencia de paso de barras.

- Corto circuito en el enrollado del estator

El enrollado del estator, comúnmente denominado polos o campos, puede presentar espiras en corte, lo cual origina que se aprecie una disminución en la velocidad de rotación y se incremente la frecuencia de deslizamiento.

- Deformaciones térmicas

Debido a la concentración de altas temperaturas, el rotor también es susceptible de sufrir deformaciones, cuyo origen radica en el aislamiento deficiente de varias láminas contiguas en zonas del propio rotor, lo que pudiera provocar el roce eventual entre este y el estator. Este problema trae consigo un efecto de "retroalimentación" ya que a pesar de que al inicio las deformaciones en el rotor son muy pequeñas, éstas logran la generación de fuerzas electromagnéticas desbalanceadas, lo cual al mismo tiempo genera mayor incremento en la temperatura, haciendo más severas las deformaciones de rotor. Este problema se puede identificar a través de los incrementos sistemáticos en los niveles de vibraciones a la frecuencia de rotación, los cuales crecen con el incremento de la temperatura.



Como seguramente se habrá advertido, existe la posibilidad de confundir este problema con un desbalance, por lo que es menester señalar que en estos casos el problema persistirá aun cuando se balancee el sistema.

- Pulsos torsionales

En los motores eléctricos siempre están presentes en mayor o menor medida los pulsos torsionales debido a que el campo magnético rotatorio energiza a los polos del estator. Normalmente esta vibración es suficientemente baja por lo que no representa una amenaza. Sin embargo, pueden excitar frecuencias de resonancias cercanas al duplo de la frecuencia de línea o producir vibraciones importantes en máquinas donde se exijan niveles de vibraciones suficientemente bajos, como por ejemplo en máquinas herramienta de alta precisión.

1.4.3. Fallas de enlace de potencia.

- Desalineación de acople de ejes

La desalineación es una condición en la que los centros de unos ejes acoplados no coinciden. La mayor parte de casos de desalineación son una combinación de desalineación paralela y angular. El diagnóstico, como regla general, se basa en vibración dominante a dos veces la velocidad de giro, con niveles altos a la velocidad de giro en la dirección axial, y bien en la dirección vertical u horizontal.

- Desalineación angular

La desalineación angular se da cuando dos ejes no son paralelos en su punto de acople. Esta se caracteriza por una elevada vibración axial que puede ser de 1 x rps o 2 x rps en algunos casos de 3 x rpm con un desfase de 180° con la vibración radial en el acoplamiento.

- Desalineación paralela

La desalineación paralela se da cuando dos ejes paralelos no coinciden en el punto de acople.



La desalineación paralela produce tanto una fuerza cortante como un momento flector en el lado de acoplamiento de cada eje. Este tipo de desalineación presenta síntomas similares a la angular, solo que en este caso la vibración es radial, de igual manera tiene un desfase aproximado de 180° con el acoplamiento.

- Desalineación por cojinete inclinado con respecto al eje

Un cojinete inclinado genera una considerable vibración axial causando incluso movimiento torsional con cambios de fase de 180° de arriba a abajo o de lado a lado cuando se mide en dirección axial sobre la caja del cojinete.

- Sobrecarga en engranajes

En sistema de engranajes todos los dientes reciben una sobrecarga continua. La amplitud de la frecuencia de engrane *GMF* (Gear Mesh Frequency) es altamente excitada, pero un pico alto de frecuencia de engrane no indica necesariamente un problema si las bandas a su alrededor se mantienen bajas. Un análisis de la sobrecarga de engrane resulta factible si se lo realiza a la máxima carga de operación de la máquina.

- Engranajes desalineados

Este problema se presenta cuando los ejes de los engranes no son paralelos, los engranajes desalineados, generan altas frecuencias de engrane con frecuencias laterales. Sin embargo, es común tener armónicos de la frecuencia de engrane con niveles más altos a dos y tres veces la frecuencia de engrane. Es por tanto importante configurar tu rango de frecuencia. Lo suficientemente alto para poder ver esas frecuencias.

- Excentricidad de poleas

Ocurre cuando el centro de rotación no coincide con el centro geométrico en una polea. Aunque es posible balancear poleas gracias a la adición de pesas, la excentricidad seguirá induciendo vibración y esfuerzos de fatiga reversible. Se recomienda cambiarse la polea excéntrica.



- Desgaste de dientes

El desgaste de dientes se produce por: operación más allá del tiempo de vida del engranaje, contaminación de la grasa lubricante, elementos extraños circulando en la caja del engrane o montaje erróneo.

Su espectro se caracteriza por la aparición de bandeo lateral alrededor de la frecuencia natural de vibración (f_n) del engrane defectuoso. El espaciado de las bandas laterales es 1 X rps del engrane defectuoso.

- Dientes agrietados o rotos

Este tipo de fallas generan picos de alta amplitud a la velocidad de giro de ese engranaje, y causara la excitación de la frecuencia natural del engranaje.

Sin embargo, el mejor modo de ver un diente agrietado o roto es vía la onda temporal. Si hubiera 12 dientes, uno de cada 12 pulsos en la onda temporal sería muy diferente de los demás pulsos. Naturalmente, la diferencia de tiempo entre esos pulsos sería igual al periodo de la velocidad de giro del engranaje (el diente engrana una vez por cada revolución).

- Distensión

Ocurre por sobrepaso de la vida útil de la banda, o por desgaste excesivo de la misma. Las frecuencias de bandas siempre están por debajo de la frecuencia del motor o máquina conducida. Para corregir el problema, si la banda no presenta demasiado desgaste intente tensionarla, de lo contrario reemplácela.

- Desalineación en poleas

Puede ocurrir porque los ejes de las poleas no están alineados o porque las poleas no están paralelas. También pueden ocurrir ambos casos simultáneamente. Para solucionar el problema deben alinearse las poleas tanto angular como paralela.



1.5. Métodos de diagnóstico en los motores de inducción

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.

Desde hace mucho tiempo y debido al empleo de ciertos métodos de análisis cualitativos y cuantitativos, ha sido posible emplear las tecnologías de monitoreo y predicción en motores de inducción. A continuación se mencionan las técnicas empleadas de manera tradicional en el diagnóstico y evaluación de estado de los motores eléctricos:

- Prueba de resistencia a tierra.
- Prueba eléctrica impulsiva.
- Prueba de sobre tensión.
- Análisis del balance de corriente.

A las técnicas anteriores se han sumado los últimos avances en este campo, incorporando los métodos de diagnóstico siguientes:

- Análisis espectral de vibraciones.



- Análisis espectral del flujo axial.
- Impedancia de secuencia inversa.
- Par electromagnético.
- Análisis espectral de intensidad de corriente.

- 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. 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 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 magneto motriz 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:

$$\left[k \pm n(1-s) / p \right] f \quad (1.1)$$

Donde f es la frecuencia fundamental de alimentación, s es el deslizamiento, 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:

$$k \cdot f \pm n \cdot f_r \quad (1.2)$$

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.

- 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 magneto motrices 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.

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 vibró metro mide nivel total de vibraciones y no se puede realizar análisis espectral para identificar los problemas, aunque sí 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.

- Análisis espectral de corriente

Desde hace más de una década, esta técnica predictiva, conocida como análisis de señal de corriente del motor (MCSA) tiene una probada fiabilidad en la detección de problemas eléctricos. Utiliza como transductor una pinza amperimétrica que convierte la corriente de alimentación a mili voltios, para proceder al análisis de la transformada de fase de Fourier (FFT) con una resolución que permite separar la frecuencia de la red eléctrica de sus bandas laterales.

Existen diferentes métodos invasivos y no invasivos para la detección de fallos utilizando técnicas de análisis de datos de origen eléctrico, mecánico o químico, entre los cuales se pueden resaltar los siguientes: análisis de vibraciones, análisis de temperatura, estimación de parámetros electromagnéticos del motor, análisis de partículas de aceite, análisis de señal de corriente del motor (MCSA).

En la Tabla 1.1 se realiza una comparación entre los principales métodos de detección de fallos, indicando las fallas que los mismos pueden detectar.

Tabla 1.1: Comparación entre los principales métodos de detección de fallos.

Fallas que puede detectar				
Método	Cortocircuito estator	Rotura de barras	Excentricidades	Rodamientos
Vibración	No	Si	Si	Si
MCSA	Si	Si	Si	Si
Temperatura	Si*	No	No	Si*
Partículas	No	No	No	Si
*Posibilidad de indicar indicio de falla				

Analizando la Tabla 1.1 se puede concluir que el método que es capaz de identificar el mayor número de fallos es el MCSA.

En este trabajo se utiliza el MCSA como técnica de detección de fallos, la cual se basa en la utilización de la transformada rápida de Fourier de la señal de corriente del estator, con el fin de detectar los distintos tipos de fallos en función del estudio.

1.6. Conclusiones del capítulo

1. Se abordaron las diferentes fallas en los motores de inducción haciendo énfasis en la excentricidad
2. En el estado del arte se ha realizado un profundo trabajo de recopilación de los principales trabajos en el ámbito de la diagnosis de fallos en las máquinas eléctricas de inducción, prestando especial interés al método de diagnóstico por espectro de frecuencia de la corriente del estator.
3. Se realizó valoración bibliográfica de los trabajos precede



CAPÍTULO 2. MÉTODO DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS POR ESPECTRO DE FRECUENCIA

2.1. 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. El análisis de la señal de corriente es una técnica usada para determinar condiciones de operación de los motores de inducción sin interrumpir la producción.

El presente capítulo tiene como objetivo elaborar una metodología de diagnóstico por espectro de frecuencia. Se elaborará un modelo para la detección de fallas como excentricidad presente en motores de inducción, con una aplicación en MATLAB, para ello se cuenta con una base de datos de mediciones experimentales realizadas en la ECG

2.2. Método de diagnóstico por espectro de frecuencia de la corriente del estator

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 del tipo eléctrica o mecánica 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).



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. El espectro de frecuencia de un fenómeno ondulatorio (sonoro, luminoso o electromagnético), superposición de ondas de varias frecuencias, es una medida de la distribución de amplitudes de cada frecuencia. También se llama espectro de frecuencia al gráfico de intensidad frente a frecuencia de una onda particular.

El espectro de frecuencias o descomposición espectral de frecuencias puede aplicarse a cualquier concepto asociado con frecuencia o movimientos ondulatorios. Un proceso que cuantifique las diversas intensidades de cada frecuencia se llama análisis espectral. Matemáticamente el análisis espectral está relacionado con una herramienta llamada transformada de Fourier o análisis de Fourier. Ese análisis puede llevarse a cabo para pequeños intervalos de tiempo, o menos frecuentemente para intervalos largos, o incluso puede realizarse el análisis espectral de una función determinista (tal como $\sin(t)/t$). Además, la transformada de Fourier de una función no sólo permite hacer una descomposición espectral de los formantes de una onda o señal oscilatoria, sino que con el espectro generado por el análisis de Fourier incluso se puede reconstruir (sintetizar) la función original mediante la transformada inversa.

El diagnóstico 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. En este capítulo utilizara este método en fallas de excentricidad.

2.3. Metodología de diagnóstico por espectro de frecuencia de la corriente del estator de los motores de inducción

A continuación, se enumera y se detalla paso a paso mediante un orden lógico la metodología para lograr un diagnóstico por espectro de frecuencia de la señal de corriente del motor:

1. Medición de la intensidad de la corriente del motor en una cierta condición de deslizamiento y evaluación del estado técnico del motor.

2. Evaluación y diagnóstico mediante el Análisis espectral de frecuencia de la corriente del estator en Motores eléctricos.
3. Identificar y evaluar los problemas mecánicos del motor de inducción.
4. Implementación de una aplicación en Matlab para el diagnóstico de fallas excentricas en los motores de inducción.
5. Planificar corrección y ejecución de las tareas.

1- Medición de la intensidad de la corriente del motor en una cierta condición de deslizamiento y evaluación del estado técnico del motor

Los ensayos realizados en el banco de prueba son la materia prima del monitoreo de condición. Se debe garantizar que los datos sean de la máxima calidad. Después de realizar ensayos sobre el motor de forma periódica con el fin de determinar la evolución del mismo y la posible aparición de desperfectos, se define el estado técnico, en la figura siguiente se muestran las principales formas:

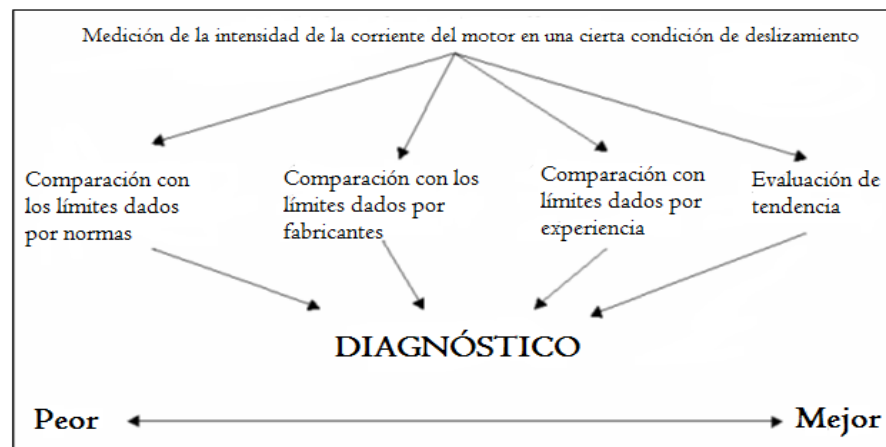


Figura 2.1. Métodos para diagnosticar estado técnico.

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.

2- Evaluación y diagnóstico mediante el Análisis espectral de frecuencia de la corriente del estator en Motores eléctricos

El propósito fundamental del método espectral de frecuencia es evaluar la condición del motor para diferentes tipos de fallas, en este caso solo se evalúa una falla de gran importancia en el motor de inducción. Esta es: Excentricidad.

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

$$g(\phi, t) = g(1 \cdot e_s \cos \phi - e_d \cos(\omega t - \phi)) \quad (2.1)$$



Dónde:

g = Longitud del entrehierro

e_s = Excentricidad estática

e_d = Excentricidad dinámica

ω = Velocidad angular

ϕ = Distancia angular alrededor del entrehierro

La frecuencia patrón de la excentricidad es:

$$f_{ec} = f_1 \left[(r \pm n_d) \cdot (1 - s / p) \pm n_{ws} \right] \quad (2.2)$$

Dónde:

f_{ec} = frecuencia de excentricidad

f_1 = frecuencia de alimentación

r = número de ranuras

$n_d = \pm 1$

$n_{ws} = 1, 3, 5, 7$

s = deslizamiento

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.



3- Identificar y evaluar los problemas mecánicos del motor de inducción

Para continuar con el diagnóstico de fallas es importante descartar problemas mecánicos a la hora de realizar el diagnóstico al motor de inducción, una vez descartados se podrá realizar entonces el análisis espectral de frecuencia de la corriente del estator.

Estas fallas mecánicas pueden ser identificadas además por la señal del espectro de vibraciones, este método puede percibir defectos de los rodamientos, desbalance, desalineación, flexiones y otros problemas mecánicos.

4- Implementación de una aplicación en Matlab para el diagnóstico de fallas en los motores de inducción

Con la ayuda del Matlab, herramienta importante en nuestra carrera se nos hizo más fácil realizar un programa donde pudimos hacer el análisis espectral, este método se hace popular por ser capaz de identificar las componentes de frecuencia en la señal de corriente, lo cual se nos hace muy difícil distinguirlas a simple vista.

Con esta herramienta pudimos determinar la transformada discreta de Fourier; (FFT), su función es capturar una señal desde una máquina, luego calcula todas las series de señales sinusoidales que contiene la señal compleja y por último la muestra en forma individual en el eje de la frecuencia.

Para la obtención de los gráficos se tiene en cuenta una serie de datos tanto nominales como datos de pruebas tomados de diferentes trabajos de los motores de inducción, datos que se reflejan en los anexos al igual que el programa que fue elaborado en el Matlab.

5- Planificar corrección y ejecución de las tareas

Órdenes 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.

Ensayos experimentales

Los experimentos consisten en la aplicación de la metodología de diagnóstico a diferentes motores de la empresa Cmdte Ernesto Che Guevara. El diagnóstico utilizando la técnica de diagnóstico de fallas por espectro de frecuencia se puede realizar con un motor en funcionamiento mostrando su validez y ventaja respecto a las utilizadas actualmente. Se eligieron motores de diferentes velocidades. Como primera muestra, se cita el ensayo realizado en un motor de inducción MI, que acciona una bomba centrífuga PB 315/40 (210 m³/h, 40 m) por la cual envía fluido con densidad variable a un recipiente donde se desea mantener constante el nivel de la hidromezcla en la planta de lixiviación de la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa.

Este motor de 55 kW de potencia, 1250 rpm, 440V se encuentra acoplado a una bomba 210 m³/h de capacidad que tiene como función enviar fluido con densidad variable a un recipiente donde se desea mantener constante el nivel de la hidromezcla. Para esto el sistema cuenta con un convertidor de frecuencia tipo inversor sinusoidal de tensión con modulación por ancho de pulsos.

En este se toman mediciones de la presión en los puntos de succión e impulsión de la bomba BC, así como en la sección recta de la tubería de transporte con el objetivo de calcular las pérdidas del subsistema. La medición de presión en los puntos de entrada y salida de la bomba centrífuga se fundamenta entre otras cosas, en el hecho de conocer la presencia del fenómeno de cavitación en estas turbo-máquinas, fenómeno muy frecuente en los procesos de transporte de fluidos en plantas químicas como es el caso. Este fenómeno puede ocasionar una sensible afectación en el trabajo de la bomba BC que se llena de gases o cavidades vacías debido a que

cuando la presión de succión de la bomba se iguala a la presión de vapor del fluido, y este va pasando al estado gaseoso. Cuando esto ocurre, aparecen fuertes sacudidas o vibraciones en la red hidráulica y su rendimiento disminuye drásticamente. La avería en este motor 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.

Paso 1: Medición de la intensidad de la corriente del motor en una cierta condición de deslizamiento y evaluación del estado técnico del motor.

Una vez adquirida la corriente de una fase del estator, sí se representa en función del tiempo se observa que la forma de onda representada responde a un tipo concreto de onda denominado senoidal. Debiéndose principalmente a que las máquinas eléctricas están alimentadas a un sistema trifásico de tensiones senoidales. En la Figura 2.2, se representa la corriente estatórica de una máquina eléctrica sana en función del tiempo.

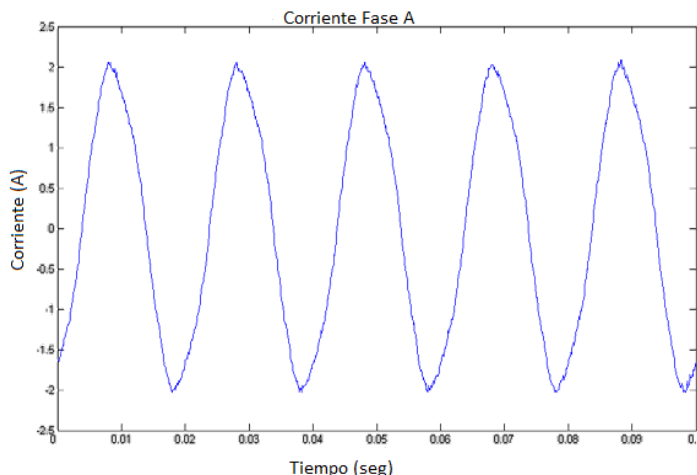


Figura 2.2. Representación temporal de la corriente de una fase de una máquina sana.

Como se observa en la Figura 2.2, es imposible intuir la posibilidad de que exista una anomalía o fallo en la máquina eléctrica. Sin embargo, si se realiza una transformación al dominio de la frecuencia de la corriente estatórica, se observa a través de su espectro las componentes que conforman dicha corriente.

Paso 2: Evaluación y diagnóstico mediante el análisis espectral de frecuencia de la corriente del estator en motores eléctricos

Matemáticamente se puede formular la corriente de una fase, donde se puede percibir que al pasar la corriente estatórica al dominio de la frecuencia está poseerá una componente fundamental correspondiente a la velocidad de giro de la máquina, la cual predominará sobre todas las demás ya que se considera la fundamental. Esta frecuencia fundamental viene marcada por la frecuencia de alimentación de la máquina eléctrica, que en el sistema de alimentación trifásico resulta a 60Hz.

En el motor de inducción pueden surgir problemas de naturaleza eléctrica y mecánica, para la identificación de los mismos se muestra el espectro de frecuencia de la corriente estatórica a través de la FFT, confirmando el estado del motor.

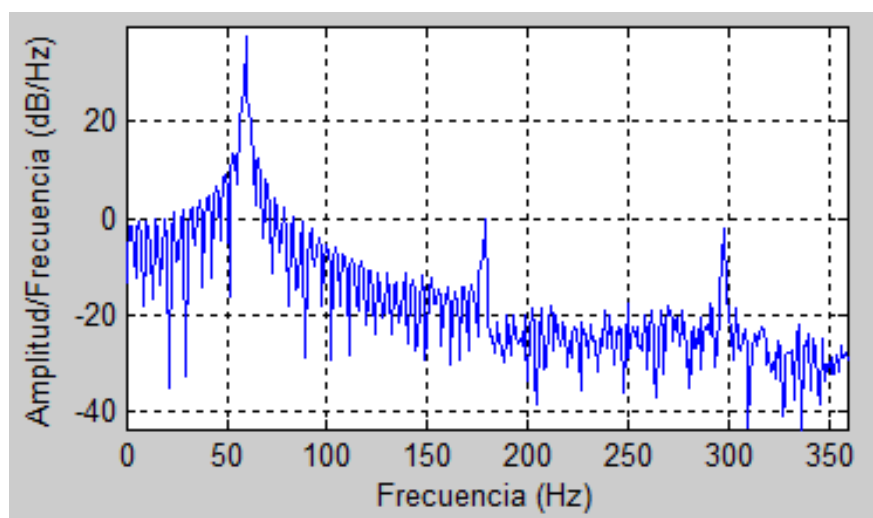


Figura 2.3. Espectro de frecuencia realizado al motor que acciona la bomba PB 315/40

En la Figura 2.3 se representa el espectro en frecuencia de la corriente que circula por los devanados del estator representada en la Figura 2.2 en función del tiempo y en la cual no se puede apreciar ningún fallo o anomalía, al analizarla en el dominio de la frecuencia se puede observar que el estado del motor con respecto a los desperfectos eléctricos mencionados anteriormente es muy bueno.



Paso 3: Identificar y evaluar los problemas mecánicos del motor de inducción

Como los problemas que se tratan en este trabajo se basan en la señal de la corriente estatórica mayormente de naturaleza eléctrica no es necesario realizar este paso, en caso de que surja algún problema mecánico se diagnosticará el motor con el espectro de vibraciones u otro método que sea capaz de detectar fallas mecánicas como son desbalance mecánico, falla en los rodamientos, etc.

Paso 4: Implementación de una aplicación en Matlab para el diagnóstico de fallos en los motores de inducción

Luego de haber evaluado el motor y de identificar los problemas se realiza un programa por el cual se obtiene el espectro de corriente en el estator, en este programa se incluyen los parámetros nominales del motor, se emplean las fórmulas de frecuencia para cada tipo de falla como excentricidad. Se le realiza la transformada de Fourier por el comando $y=fft(Y, NM)$, se obtienen además las frecuencias superior e inferior para el tipo de falla por los comandos $F_{Sup}=f(f=FS)$ y $F_{Inf}=f(f=FI)$.

Nota: El programa en Matlab se encuentra en los anexos.

Paso 5: Planificar corrección y ejecución de las tareas

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

La corrección se realizará en el momento más adecuado, de la forma más eficiente y eficaz posible, con afectación mínima al proceso de producción, ya que se debe aprovechar para ello una parada en el motor.

Segundo experimento

Se tiene el motor de 2,23 kW, con accionamiento en bombas PB-315 B, de la planta de Lixiviación de la empresa Ernesto Che Guevara. El mismo posee los siguientes datos; 1725 rpm, un deslizamiento igual a 0.041, 30 ranuras, 2 polos y una frecuencia de alimentación de 60Hz. Para verificar su funcionamiento teórico, tanto

la tensión como la corriente en el dominio temporal no nos aportan la detección de la excentricidad. En las figuras 2.2 y 2.3 se representa respectivamente la corriente de una fase tomada del motor en el dominio temporal donde no se observa ninguna anomalía, así como en el dominio frecuencial donde se representa de 0 a 100 Hz y sólo aparece la frecuencia característica de la red.

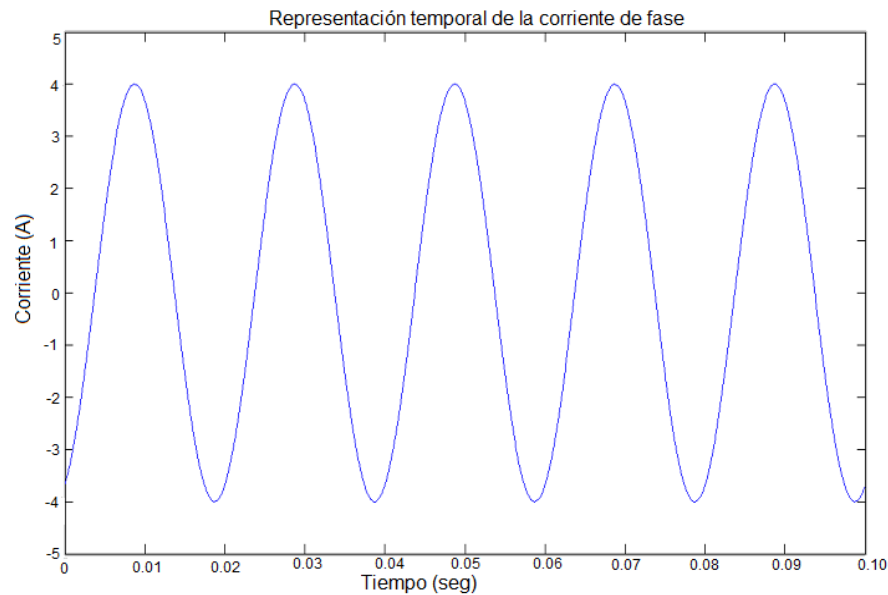


Figura 2.4 Representación temporal de la corriente de una fase del motor.

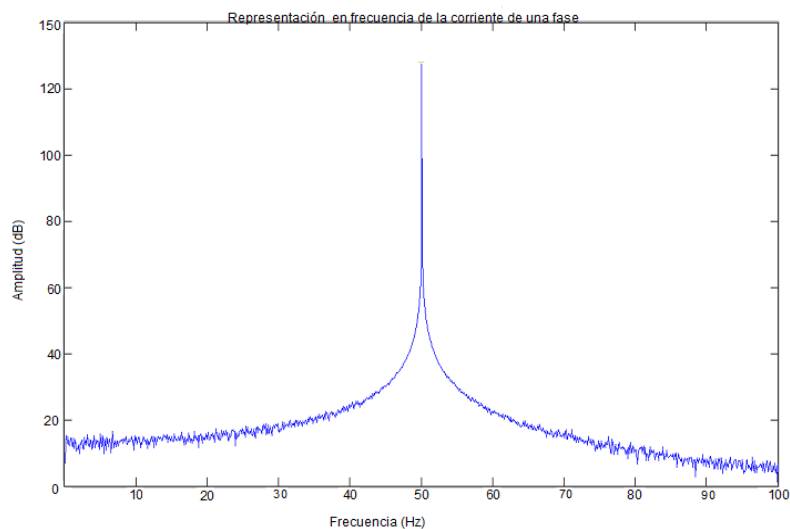


Figura 2.5. Representación en frecuencia de la corriente de una fase del motor.

Para identificar si existe alguna falla en el motor se pasó a aumentar el valor de la frecuencia hasta 7000Hz, además se calcularon las frecuencias teóricas de excentricidad tanto estática como dinámica para comprobar si el motor presenta alguna de estas fallas.

Tabla 2.1: Frecuencia teórica de excentricidad estática

Frecuencias Teóricas		
$f_{estática} = [((k \cdot N)(1 - s / p) \pm n_{ws})] f$		
K=1	f=923.1 Hz	f=803.1 Hz
K=2	f=1786.2 Hz	f=1666.2 Hz
K=3	f=2649.3 Hz	f=2529.3 Hz
K=4	f=3512.4 Hz	f=3392.4 Hz
K=5	f=4375.5 Hz	f=4255.5 Hz
K=6	f=5238.6 Hz	f=5118.6 Hz
K=7	f=6101.7 Hz	f=5981.7 Hz

Tabla 2.2: Frecuencia teórica de excentricidad dinámica.

Frecuencias Teóricas			
$f_{dinámica} = [((k * N \pm n_d) * (1 - s / p) \pm n_{ws})] * f$			
K=1	n _d =1	f=951.87 Hz	f=774 Hz
K=1	n _d =2	f=980.64 Hz	f=745.56 Hz
K=1	n _d =3	f=1009.3 Hz	f=716.4 Hz
K=1	n _d =4	f=1038.18 Hz	f=688.02 Hz
K=1	n _d =5	f=1066.8 Hz	f=658.8 Hz

A continuación se presenta la Figura 2.4, donde se aprecia el espectro de frecuencia hasta 7000 Hz de la corriente de una fase y en la cual se pueden observar las frecuencias características que se muestran en las tablas 3 y 4, de este modo se puede comparar los valores teóricos con los resultados obtenidos del modelo implementado en la presente tesis, comprobando de este modo que el motor presentó una excentricidad estática.

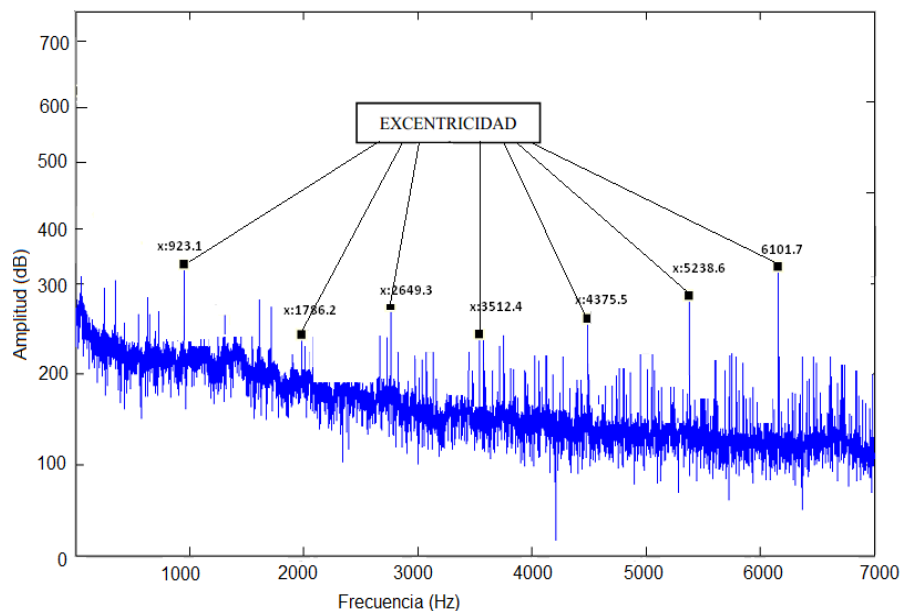


Figura 2.4 Motor 2.23 kW con excentricidad estática.

2.4. Conclusiones Parciales

Una de las principales técnicas de detección de fallos en máquinas de inducción ha sido presentada para 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.

Se llevó a cabo la metodología propuesta aplicándola como prueba a diferentes máquinas eléctricas. Estos ensayos sirven para validar el correcto funcionamiento de la técnica propuesta. Por ejemplo en el fallo de la excentricidad no existe ningún índice fiable que determine o cuantifique el grado de excentricidad, tan sólo son conocidas las frecuencias teóricas, que se agrupan por familias.



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 excentricidades.

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.



CAPÍTULO 3: VALORACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICO Y AMBIENTAL.

3.1. 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.

3.2. 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 las 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 la planta.

La rentabilidad económica de las actuaciones de la metodología de diagnóstico podrá demostrarse con datos numéricos reales en las empresas Minero-Metalúrgicas de Moa cuando sea establecida en las empresas. 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.

3.3. 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 como muestra el motor con accionamiento en la bomba PB-315 B de la planta de Lixiviación.

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.



Tabla 3.1. Costo del mantenimiento

Tipo Mtto	Periodicidad	Tiempo parada equipo	Duración	Costo	Tareas a realizar
MPP	2160 h (3 meses)	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 espectro de frecuencia con lo que se puede detectar: ➤ Excentricidad ➤ 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.

3.4. 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.



De manera general, las acciones dirigidas a prevenir los riesgos de impacto medioambiental, 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.

3.5. Análisis y mejoras de los procesos

En la gestión del mantenimiento integrada a un 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 establecido 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. Establecer acciones proactivas mediante procedimientos documentados para la eliminación de las causas que originan los impactos medioambientales.

3.6. Conclusiones Parciales

Se tiene un estudio de la incidencia del costo que representa el mantenimiento predictivo en motores de inducción. Con la metodología de diagnóstico propuesta se realizarían un diagnóstico por cada mes, lo que da una medida de mayor seguridad, ahorro y confiabilidad de operación.



CONCLUSIONES GENERALES

En esta tesis se ha abordado el tema, Metodología para el diagnóstico de fallas de excentricidad en motores de inducción por el espectro de frecuencia de la corriente del estator. Con el fin, se desarrolla una herramienta programada en MATLAB, que nos facilitó el análisis espectral de la corriente a través de la transformada de Fourier.

1. Se estableció una metodología para el diagnóstico por el análisis espectral de la frecuencia de la corriente del estator de los motores de inducción
2. Se identificó y diagnosticó problemas electromecánicos en los motores de inducción con esta metodología.
3. Se estableció un análisis técnico-económico, mostrando que el diagnóstico por el análisis espectral de la señal de la corriente es más efectivo que realizar el mantenimiento preventivo al motor de inducción.



RECOMENDACIONES

1. Generalizar esta metodología del diagnóstico de fallas por espectro de frecuencia de los motores de inducción en las Empresas Minero- Metalúrgico de Moa.
2. 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.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] PUCHE PANADERO, Rubén. *Nuevos Métodos de Diagnosis de excentricidad otras máquinas rotóticas en máquinas eléctricas de inducción a través del análisis de la corriente estatórica*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, 2008.
- [2] Motor Reliability Working Group, Report of large motor reliability survey of industrial and comercial installations Part I, and II. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1985 July-Aug., 21 (4): 853-872
- [3] FERNÁNDEZ. M; et.al. *Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*. Barcelona: Marcombo, 1998.
- [4] TALAM, R. Survey of methods for detection of stator related faults in induction machines. En: *The IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives*. Atlanta: SDEMPED, 2003 [Agosto de 2003], p. 35- 46.
- [5] GARCÍA, M; et al. Study of an induction motor working under stator winding inter-turn short circuit condition. En: *The IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED*. Atlanta: SDEMPED, 2003 [Agosto de 2003], p. 52- 57.
- [6] TRUTT, F.C; SOTTILE, J.; KOHLER, J.L. Detection of A.C. machine winding deterioration using electrically excited vibrations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2001, Vol. 37: 10-13
- [7] STAVROU, A; SEDDING PENMAN, J. Current monitoring for detecting inter-turn short circuits in induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2001, Vol. 16: 32-37.
- [8] VALENCIA MUÑOZ, N. *El flujo axial de dispersión como indicador del estado del aislamiento de los devanados de los motores de inducción*. Trabajo de Diploma. Universidad de Antioquia, 2003.
- [9] ARKAN,M; KOSTIC-PEROVIC,D y UNSWORTH, P.J. Modelling and simulation of induction motors with inter-turn faults for diagnostics. *Electric Power Research*, 2005, Vol. 75: 57-66.



- [10] LEGER, R.P; GARLANDW, J; POEHLMAN, W.F.S. Fault detection and diagnosis using statistical control charts and artificial neural networks. *Artificial intelligence in engineering*, 1998, Vol. 12: 35-47.
- [11] STEVENSON, W.D. *Análisis de sistemas eléctricos de potencia*. México: McGraw-Hill, 1979.
- [12] Mantenimiento predictivo en motores eléctricos (parte 5). *ElectroMagazine*, 2005, No. 13 Julio.
- [13] LORES SUÁREZ, ELVIS. *Metodología para el diagnóstico vibro eléctrico de motores de inducción*. Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico,



ANEXOS

Las mediciones del primer experimento fueron tomadas de pruebas realizadas al motor en vacío, en la planta de lixiviación de la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa, en los ensayos realizados a este experimento se midieron las tres corrientes de fase, además se miden las tres tensiones entre cada una de las fases, luego se le realiza el diagnóstico al motor de inducción por espectro de frecuencia

Así pues, se realizan multitud de ensayos con diferentes máquinas, en este trabajo sólo se muestran los más representativos.

Tabla1: Datos del motor de 55 kW, 1250 rpm, con accionamiento en bombas WARMAN.

Potencia Nominal, (kW).	55
Tensión Nominal, (U).	440
Corriente nominal, (A).	85
Factor de Potencia Nominal, (PU).	0.85
Frecuencia Nominal, (Hz).	60
Velocidad Nominal del rotor, (rev/min).	1250
Conexión del devanado del estator, (Estrella, Delta).	Estrella
Resistencia de fase del estator, (Ohms).	0.087
Momento máximo/Momento Nominal, (ks), (PU)	2 ks
Momento de arranque/Momento Nominal, (karr), (PU).	2 karr
Número de muestra por ciclo	100
Número de ciclos a evaluar	10
Números de pares de polos	2
Número de ranuras del rotor	33



Tabla 1.1: Mediciones experimentales del motor de 55 kW, 1250 rpm.

#	Time (ms)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)
1	0.00	-8	-1	11	-67	-132	459
2	0.26	0	-4	5	-32	-162	452
3	0.52	1	-6	6	0	-190	441
4	0.78	1	-10	10	28	-215	426
5	1.04	1	-14	13	63	-239	403
6	1.30	1	-17	17	98	-262	378
7	1.56	1	-21	20	134	-281	352
8	1.82	1	-22	22	167	-297	325
9	2.08	0	-22	22	193	-311	288
10	2.35	0	-19	19	223	-327	251
11	2.61	0	-14	13	248	-336	213
12	2.87	3	-8	4	267	-338	174
13	3.13	7	-6	-2	280	-339	130
14	3.39	10	-8	-1	301	-336	84
15	3.65	13	-12	-1	310	-329	37
16	3.91	17	-16	0	315	-322	-7
17	4.17	20	-20	0	327	-311	-56
18	4.43	21	-21	0	336	-295	-98
19	4.69	22	-22	0	338	-281	-139
20	4.95	21	-20	0	338	-260	-181
21	5.21	18	-16	-3	336	-236	-223
22	5.47	13	-11	-2	334	-213	-262
23	5.73	7	-3	-4	317	-185	-295
24	5.99	6	0	-6	301	-157	-325
25	6.25	10	1	-10	283	-125	-355
26	6.51	13	1	-13	264	-91	-376
27	6.78	16	1	-16	241	-56	-399
28	7.04	19	1	-19	218	-25	-420
29	7.30	21	2	-21	192	0	-436
30	7.56	21	2	-22	164	37	-445
31	7.82	19	1	-21	127	74	-454
32	8.08	15	1	-16	97	109	-459
33	8.34	8	2	-10	67	139	-457
34	8.60	0	5	-4	35	165	-452
35	8.86	-1	6	-5	2	192	-438
36	9.12	-2	10	-8	-30	215	-420
37	9.38	-1	13	-12	-63	241	-401
38	9.64	-1	17	-15	-97	266	-378
39	9.90	-1	20	-19	-130	280	-350
40	10.16	-1	22	-21	-160	295	-320
41	10.42	-1	21	-20	-190	311	-285
42	10.68	-1	18	-17	-220	325	-251
43	10.94	-1	13	-12	-248	334	-215
44	11.21	-3	8	-4	-267	338	-172
45	11.47	-7	6	2	-283	341	-127
46	11.73	-10	8	2	-299	336	-84
47	11.99	-14	13	1	-310	331	-39
48	12.25	-17	16	1	-318	322	7
49	12.51	-20	20	0	-327	311	55
50	12.77	-22	22	0	-329	295	98

(continúa)



Diagnóstico de fallas de excentricidad en motores de inducción

Tabla 1.1: Mediciones experimentales del motor de 55 kW, 1250 rpm (continuación).

#	Time (ms)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)
51	13.03	-22	23	0	-334	280	141
52	13.29	-21	21	1	-336	260	181
53	13.55	-18	17	1	-334	237	223
54	13.81	-13	12	2	-325	213	262
55	14.07	-8	4	4	-313	186	294
56	14.33	-6	0	7	-301	153	324
57	14.59	-8	0	10	-283	125	353
58	14.85	-12	0	13	-262	93	380
59	15.11	-15	0	16	-243	60	403
60	15.37	-19	-1	20	-220	26	422
61	15.64	-21	-3	22	-192	-4	434
62	15.90	-22	-1	23	-164	-37	445
63	16.16	-20	-1	21	-134	-72	459
64	16.42	-16	-1	17	-100	-107	459
65	16.68	-8	-2	11	-69	-137	456
66	16.94	-1	-4	5	-35	-165	452
67	17.20	0	-6	6	-2	-192	443
68	17.46	1	-10	10	32	-213	427
69	17.72	1	-13	13	56	-239	405
70	17.98	1	-17	17	91	-260	382
71	18.24	1	-21	20	130	-280	353
72	18.50	0	-23	22	164	-295	320
73	18.76	-1	-22	22	193	-308	288
74	19.02	0	-19	19	222	-322	251
75	19.28	0	-14	14	246	-336	216
76	19.54	3	-8	6	266	-341	176
77	19.80	7	-6	-2	288	-341	134
78	20.07	10	-8	-1	299	-338	86
79	20.33	13	-12	-1	310	-332	40
80	20.59	17	-15	-1	318	-324	-5
81	20.85	20	-19	0	327	-311	-60
82	21.11	24	-21	0	336	-297	-97
83	21.37	22	-22	0	338	-280	-135
84	21.63	21	-20	0	338	-266	-179
85	21.89	17	-16	-1	334	-243	-222
86	22.15	12	-11	-1	325	-215	-257
87	22.41	7	-3	-4	310	-186	-292
88	22.67	6	1	-7	301	-158	-324
89	22.93	9	0	-10	287	-127	-353
90	23.19	12	1	-13	262	-91	-380
91	23.45	16	1	-16	241	-60	-406
92	23.71	19	1	-20	220	-28	-422
93	23.97	21	1	-22	195	-2	-436
94	24.23	21	1	-23	165	33	-447
95	24.50	20	2	-20	135	72	-454
96	24.76	16	2	-16	97	107	-459
97	25.02	9	2	-11	69	134	-459
98	25.28	1	6	-5	37	162	-450
99	25.54	-1	7	-6	4	188	-440
100	25.80	-1	10	-8	-26	213	-413



Segundo experimento

Las mediciones del primer experimento fueron tomadas de pruebas realizadas al motor en vacío, en la planta de lixiviación de la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa, en los ensayos realizados a este experimento se midieron las tres corrientes de fase, además se miden las tres tensiones entre cada una de las fases, luego se le realiza el diagnostico al motor de inducción por espectro de frecuencia

Tabla 3: Datos nominales del motor de 2,23 kW, con accionamiento en bombas PB-315 B.

Potencia Nominal, (kW).	2.23
Tensión Nominal, (U).	220
Corriente nominal, (A).	6.91
Factor de Potencia Nominal, (PU).	0.85
Frecuencia Nominal, (Hz).	60
Velocidad Nominal del rotor, (rev/min).	1725
Conexión del devanado del estator, (Estrella, Delta).	Estrella
Resistencia de fase del estator, (Ohms).	0.435
Momento máximo/Momento Nominal, (ks), (PU)	2,75 ks
Momento de arranque/Momento Nominal, (karr), (PU).	2.50 karr
Número de muestra por ciclo	100
Número de ciclos a evaluar	10
Números de pares de polos	2
Número de ranuras del rotor	30



Diagnóstico de fallas de excentricidad en motores de inducción

Tabla 3.1: Mediciones experimentales del motor de 2.23 kW, 1725 rpm.

#	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)
1	382	408	20	93	376	299
2	92	116	23	55	364	313
3	3	14	23	0	317	339
4	12	12	35	72	244	320
5	14	301	309	100	200	315
6	14	561	578	132	206	317
7	17	711	728	162	178	339
8	17	789	804	190	141	348
9	17	786	804	229	109	355
10	20	705	720	244	98	362
11	20	532	549	274	90	369
12	20	275	298	299	91	380
13	20	46	72	325	2	331
14	23	14	9	325	76	278
15	199	14	185	313	91	273
16	460	14	442	299	107	222
17	645	14	627	315	144	174
18	757	17	740	334	183	139
19	806	17	786	359	225	91
20	783	17	763	357	241	98
21	679	20	656	361	262	100
22	491	20	471	383	301	65
23	220	23	199	376	311	53
24	43	23	26	329	318	0
25	20	43	23	5	334	327
26	14	9	23	81	281	334
27	14	202	220	72	218	313
28	14	460	480	120	181	311
29	17	645	665	142	174	353
30	20	757	778	174	157	355
31	20	789	812	215	118	346
32	23	740	763	236	98	366
33	23	601	624	273	84	362
34	26	376	402	297	30	334
35	26	69	104	302	26	341
36	29	20	3	338	23	304
37	66	20	61	345	84	232
38	318	20	295	399	125	193
39	541	20	517	357	157	139
40	3,9	679	20	308	160	160
41	4,16	757	20	324	165	165
42	4,42	766	23	346	220	113
43	4,68	694	23	346	241	107
44	4,94	541	23	352	264	95
45	5,2	306	26	364	301	65
46	5,46	69	26	320	318	18
47	5,72	9	29	285	331	62
48	5,98	12	46	236	313	81
49	310	37,8	272,2	75,3	93,3	18
50	299	17,8	281,6	79	93,3	14,3

(continúa)



Tabla 3.1: Mediciones experimentales del motor de 2.23 kW, 1725 rpm (continuación).

#	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)
51	290	1,1	289	79,9	90,6	10,7
52	280	14,5	294	81,6	87	5,4
53	270	30,4	300	85	86,1	0,8
54	261	45,1	307	85	82,4	3,5
55	253	58,8	311	87,7	80,6	7,1
56	242	72,2	312	86,9	77,1	9,8
57	228	86,8	315	88,7	74,4	14,3
58	216	102	319	89,5	72,5	17
59	203	119	322	90,5	69,9	20,6
60	189	135	325	87,7	66,2	21,5
61	175	151	326	86,7	61,7	25
62	159	166	326	87,6	58	29,6
63	145	182	327	87,5	55,3	32,2
64	131	196	327	85,7	49,8	35,9
65	117	205	325	83,8	46,2	37,6
66	101	221	323	84,7	40,7	44
67	85,7	235	320	84,7	37,2	47,5
68	69,7	248	317	81,8	32,5	49,3
69	53,7	259	312	82	29	53
70	36,9	268	305	80,2	24,5	55,7
71	17,5	279	297	78,2	18,1	60,1
72	0,1	289	288	74,7	13,6	61,1
73	16,4	296	280	73,7	9,9	63,8
74	31,7	302	270	65,5	1,7	63,8
75	45,8	306	261	65,6	2,7	68,3
76	59,8	312	252	64,8	6,2	71
77	73,3	316	243	62,8	9,9	72,7
78	87,4	318	231	57,4	14,4	71,8
79	102	321	218	53,7	18,1	71,8
80	118	324	205	53,7	20,8	74,5
81	134	327	193	48,4	25,3	73,7
82	149	329	180	43,7	29	72,7
83	164	330	165	41	33,5	74,5
84	179	331	151	32,9	38,9	71,8
85	194	332	137	32,8	41,7	74,5
86	207	331	124	28,5	45,2	73,7
87	219	329	109	28,3	48,9	77,2
88	233	327	94,2	20,2	54,3	74,5
89	246	325	78,6	15,7	58	73,7
90	258	322	63,4	14,7	60,7	75,4
91	268	316	47,8	8,5	65,2	73,7
92	278	308	29,7	3,8	69,9	73,7
93	288	299	11,2	1,6	73,4	71,8
94	295	289	5,4	8	77,1	69,1
95	300	279	21,2	9,6	77,9	68,3
96	305	269	36,3	16	80,6	64,6
97	310	259	50,9	18,8	83,4	64,6
98	314	250	63,9	21,5	83,4	61,9
99	317	240	77,1	25,1	84,3	59,2
100	319	228	91,4	28,7	85,3	56,6



Programa en MATLAB para obtener el espectro de frecuencia de la corriente a través de la Transformada de Fourier (FFT).

% Análisis espectral a través de FFT

%=====

=====

% CARGAR LOS DATOS GUARDADOS EN TRABAJO

%=====

[Filename, pathname] = uigetfile ({ '*.mat', 'MAT-files (*.mat)' }, ... 'Seleccione TRABAJO', 'MultiSelect', 'on');

load([pathname filename]);

% Entrada de los datos de las mediciones.

%=====

% Aquí se cargan los valores de las corrientes y tensiones que fueron elegidas para realizar el diagnostico.

=====

=====

% DATOS NOMINALES DEL MOTOR EN ESTUDIO

%=====

prompt={'Potencia Nominal,[kW]', 'Tensión Nominal (Línea-Línea), [V]', ...

 'Factor de Potencia Nominal, [PU]', 'Eficiencia Nominal, [PU]', ...

 'Frecuencia Nominal, [Hz]', 'Velocidad Nominal del rotor, [rev/min]', ...

 'Conexión del devanado del estator, [ESTRELLA (Y, y) o DELTA (D, d)]', ...

 'Resistencia de fase del devanado del estator[Ohms]', ...

 'Momento Máximo Nominal (ks), [PU]', ...

 'Momento de arranque/ Momento Nominal (karr), [PU]', ...

 'Número de muestra por ciclo', 'Número de ciclos a evaluar

 'Número de ranuras del motor, [PU]'};

dlgTitle=('DATOS PRINCIPALES DEL MOTOR EN ESTUDIO');

lineNo=1;

options.Resize='on';

corto=inputdlg(prompt,dlgTitle,lineNo,def1,options);

Pn = str2double(corto {1}); Vn = str2double(corto{2});

fpn = str2double(corto{3}); Efn = str2double(corto{4});

fN = str2double(corto{5}); Nn = str2double(corto{6});



```

Conexion = corto{7};          Rs = str2double(corto{8});
Mmax_Mn = str2double(corto{9}); Marr_Mn = str2double(corto{10});
N = str2double(corto{11});     NC = str2double(corto{12});
Z = str2double(corto{13}); % Tiempo entre ciclos
%=====

switch Conexion
    case {'Estrella', 'estrella', 'ESTRELLA', 'Y', 'y'}
        rs = Rs;
    case {'Delta', 'delta', 'DELTA', 'D', 'd'}
        rs = Rs/3;
    otherwise
end

% Cálculos nominales adicionales (para la frecuencia de 60 Hz)
if Nn>1800; p=1; elseif Nn>1200; p=2; elseif Nn>900; p=3;
elseif Nn>750; p=4; elseif Nn>600; p=5; elseif Nn>514; p=6;
elseif Nn>450; p=7; else p=8;
end

Ns = 60*fN/p; % Velocidad del campo para la frecuencia nominal.
Sn = (Ns-Nn)/Ns;      wo = 2*pi*fN;

In = Pn/(Efn*sqrt(3)*Vn*fpn)*1e3; P1n = sqrt(3)*In*Vn*fpn/1000;
S1n = sqrt(3)*In*Vn/1000;      Q1n = sqrt(S1n^2-P1n^2);
Zpn = Pn/Efn-Pn;      Tn = 9550*Pn/Nn;

if Pn<=90

    pad=0.018*1000*Pn; pfbN=0.03*1000*(Pn); % En Watts;
elseif Pn>=91 && Pn<=375
    pad=0.015*1000*Pn; pfbN=0.03*1000*(Pn);
elseif Pn>=376 && Pn<=1850
    pad=0.012*1000*Pn; pfbN=0.03*1000*(Pn);
elseif Pn>=1851
    pad=0.009*1000*Pn; pfbN=0.03*1000*(Pn);
end

```



```
% =====  
for qq = 1:(length(Ia)/N-2); % 128 muestras por cada ciclo  
    NC = qq + 2;  
    NC1(qq,:) = NC;  
  
    Tp = 1/fN; % Tiempo de muestreo  
    Ts = Tp/(N-1); % Intervalo de tiempo entre las muestras  
    NM = NC*N; % Número de muestras consideradas  
    Fs = 1/Ts; % Frecuencia de muestreo  
  
    % for gg = 1:21;  
    %     Z = 22+2*gg; % Z = 24 a 64; % Número de ranuras  
    % Z=24;  
  
    % figure(gg) % Para graficar todas las corridas  
  
    for l = 1:3  
        y = DO(:,l+3)'; % Corriente por cada fase por separado  
  
        subplot(3,3,l)  
        plot(y),grid  
        if l == 1  
            title('Corriente Fase A')  
        elseif l == 2  
            title('Corriente Fase A')  
        else  
            title('Corriente Fase A')  
        end  
        labela('Corriente (A)')  
        xlabel('Tiempo (s)')  
  
        % Se hace muy difícil identificar las componentes de frecuencias en esta  
        señal;
```



% Es por ello que se hace popular el análisis espectral.

% Realizando la transformada discreta de Fourier se hace fácil; (FFT).

```
Y = fft(y,NM);
```

% La densidad espectral de potencia es una medida de la energía a varias frecuencias.

```
Pyy = abs(Y).^2/NM;
```

```
f = Fs/NM*(0:NM-1); % Frecuencia
```

```
Pyy = Pyy./f; % Espectro de amplitud
```

```
f = Fs/NM*(0:NM/2); % Debido a la simetría de frecuencia en la fft.
```

```
[yy,no]=max(Pyy(Pyy ~=inf)); % Máximo del espectro de frecuencia
```

```
fcal = f(no+1); % Frecuencia de mayor densidad de energía
```

```
fcal1(:,l) = fcal;
```

```
subplot(3,3,l+3)
```

```
plot(f(1:end),Pyy(1:NM/2+1)),grid
```

```
if l == 1
```

```
    title('Densidad espectral Fase A')
```

```
elseif l == 2
```

```
    title('Densidad espectral Fase B')
```

```
else
```

```
    title('Densidad espectral Fase C')
```

```
end
```

```
ylabel('Amplitud/Frecuencia')
```

```
xlabel('Frecuencia (Hz)')
```

%Fórmulas de frecuencia para determinar si existe excentricidad en el motor.

```
FS = round(fcal)+20; % Frecuencia máxima del rotor (Ventana)
```

% Estas son las frecuencias de la señal original.



```
subplot(3,3,l+6)
```

```
Pxx = Pyy(J:k-1);
```

```
[Pxx1,xx] = max(Pxx); Pxx(xx)=60;
```

```
plot(f(J:k-1),Pxx),grid
```