

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico

TEMA:

**“METODOLOGÍA PARA EL DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN MOTORES
DE INDUCCIÓN DE BAJA TENSIÓN POR EL ESPECTRO DE
FRECUENCIA DE LA CORRIENTE DEL ESTATOR.”**

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO**

Autor:

Valencia Mejia Eduardo Patricio

Director

Ing. Claudio Otero

Ibarra, 2018



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DEL CONTACTO	
Cédula de Identidad	0401613435
Apellidos y Nombres	VALENCIA MEJIA EDUARDO PATRICIO
Dirección	IBARRA
E-mail	patriciovm@live.com
Teléfono Fijo	062580931
Teléfono Móvil	0979773806
DATOS DE LA OBRA	
Título	“Metodología para el diagnóstico de fallas en motores de inducción de baja tensión por el espectro de frecuencia de la corriente del estator.”
Autor	VALENCIA MEJIA EDUARDO PATRICIO
Fecha	10 – Junio - 2018
Programa	PREGRADO
Título por el que se aspira:	INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO
Director	Ingeniero Claudio Otero

2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, VALENCIA MEJIA EDUARDO PATRICIO, con cédula de identidad Nro. 040161343-5, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en forma digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad de material y como apoyo a la educación, investigación y extensión, en concordancia con la ley de Educación Superior artículo 144.

3. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad Técnica del Norte en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, 10 de junio de 2018



VALENCIA MEJIA EDUARDO PATRICIO

C.I. 040161343-5



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR
DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL
NORTE

Yo, VALENCIA MEJIA EDUARDO PATRICIO, con cédula de identidad Nro. 040161343-5, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor del trabajo de grado denominado: “METODOLOGÍA PARA EL DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN MOTORES DE INDUCCIÓN DE BAJA TENSIÓN POR EL ESPECTRO DE FRECUENCIA DE LA CORRIENTE DEL ESTATOR”, que ha sido desarrollado para optar el título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico, en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos concedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, 10 de junio de 2018

VALENCIA MEJIA EDUARDO PATRICIO
C.I. 040161343-5



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DECLARACIÓN

Yo VALENCIA MEJIA EDUARDO PATRICIO, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; y que éste no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Técnica del Norte, según lo establecido por las Leyes de Propiedad Intelectual, Reglamentos y Normatividad vigente de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, 10 de junio de 2018

VALENCIA MEJIA EDUARDO PATRICIO

C.I. 040161343-5



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN

Certifico que la Tesis “METODOLOGÍA PARA EL DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN MOTORES DE INDUCCIÓN DE BAJA TENSIÓN POR EL ESPECTRO DE FRECUENCIA DE LA CORRIENTE DEL ESTATOR.” ha sido realizada en su totalidad por el Sr: VALENCIA MEJIA EDUARDO PATRICIO portador de la cédula de identidad número: 040161343-5

MSc. Claudio Otero

Director de Tesis

DEDICATORIA

El presente trabajo de grado se lo dedico a mis padres, que nunca me abandonaron, aun en los momentos más difíciles de mi vida, y así lograr mis objetivos, y por su fortaleza y empeño por sacarnos adelante, agradezco a los docentes de la carrera los cuales compartieron sus conocimientos los cuales fueron esenciales para la formación del perfil profesional, y un agradecimiento aparte para quienes guiaron mi trabajo, agradezco a dios por la fortuna de contar con las mejores personas que se encuentran a mi lado.

VALENCIA M. EDUARDO P

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Técnica del Norte por haberme permitido realizar y culminar mi formación personal, cultural y profesional, a todos los ingenieros de la carrera por haber compartido sus conocimientos necesarios para desempeñarme en mis funciones laborales.

Un agradecimiento especial al MSc. CLAUDIO OTERO director del Trabajo de Grado, y al Msc. Olger Arellano, quienes guiaron y contribuyeron permanentemente en este Trabajo de Grado para su elaboración y por la amistad y confianza otorgada.

VALENCIA M. EDUARDO P

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 estas. Este trabajo expone, luego de un estudio, una metodología para evaluar utilizando la técnica frecuencial mediante los espectros de las corrientes en el estator del motor de inducción, fallas como roturas de barras del rotor y 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 cada tipo de falla mencionadas anteriormente de algunos motores que se averían en una empresa a nivel industrial, y esto serviría de base para elaborar el modelo predictivo del motor de inducción. 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 estos tipos de fallas en el motor de inducción a nivel industrial.

Abstract

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 plant of production, 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

summary 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.

INDICE

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE	i
Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas	i
Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico	i
AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN	ii
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR	iv
DECLARACIÓN.....	v
CERTIFICACIÓN.....	vi
DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTO	viii
Resumen.....	ix
Abstract.....	ix
INDICE.....	xi
Indice de figuras	xiv
TEMA 1	
A1. INTRODUCCIÓN.....	1
A2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
A3. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	3
A4. ALCANCE DEL TRABAJO.....	3
A5. VIABILIDAD DEL TRABAJO	4
A6. OBJETIVO GENERAL	4
A7. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
MARCO TEÓRICO.	5
1.1 Motores Eléctricos de Inducción.....	5
1.2 Fallas en un motor de inducción.	6
1.2.1 Fallas Mecánicas	6
Las fallas mecánicas se pueden dividir en tres partes.	6
• Desbalance mecánico.....	6
• Fallas en los rodamientos.....	6
• Excentricidad.....	6
- Desbalance Estático	7
- Desbalance en dos planos o tipo par.....	8
- Desbalance por rotor colgante.	9
1.3 Fallas en los rodamientos.	9

1.4	Excentricidad.....	10
1.4.2	Excentricidad de tipo dinámica.....	11
1.4.3	Excentricidad combinada estática – dinámica.....	11
1.5	Fallas eléctricas.....	12
1.5.1	Fallas en la simetría de los bobinados del estator.....	12
1.5.2	Fallas en la simetría de los bobinados del rotor (Jaula).....	13
1.5.3	Falla por desbalance de voltaje.....	13
1.5.4	Falla por pico de voltaje.....	13
1.5.5	Ranuras del estator y ranuras del rotor.....	13
1.6	Barras del rotor agrietadas o rotas.....	14
1.7	Corto circuito en el enrollado del estator.....	14
1.8	Deformaciones térmicas.....	15
1.9	Pulsos torsionales.....	15
1.10	Fallas de enlace de potencia.....	16
1.11.1	Desalineación de acople de ejes.....	16
1.11.2	Desalineación angular.....	16
1.11.3	Desalineación paralela.....	16
1.11.4	Desalineación por cojinete inclinado con respecto al eje.....	16
1.11.5	Sobrecarga en engranajes.....	17
1.11.6	Engranajes desalineados.....	17
1.11.7	excentricidad de poleas.....	17
1.11.8	Desgaste de dientes.....	17
1.11.9	Dientes agrietados o rotos.....	18
1.11.10	Distensión.....	18
1.11.11	Desalineación en poleas.....	18
1.12	Métodos de diagnóstico en los motores de inducción.....	18
1.13	Análisis espectral de vibraciones.....	20
1.14	Análisis espectral del flujo axial.....	21
1.14.1	Impedancia de secuencia inversa.....	24
1.14.2	Par electromagnético.....	24
1.14.3	Análisis espectral de corriente.....	25
CAPÍTULO II.....		27
2.	METODOLOGIA DE INVESTIGACION Y DESARROLLO DEL ESTUDIO.....	27
2.1	Tipos de Investigación.....	27

2.1.1	Investigación documental o bibliográfica.	27
2.1.2	Investigación de campo.....	27
2.2	Métodos.	27
2.2.1	Método deductivo.....	28
2.2.2	Método inductivo.....	28
2.2.3	Método analítico.....	28
2.2.4	Método sintético.....	28
2.2.5	Método experimental.	29
2.3	Técnicas e instrumentos	29
CAPITULO III		31
3.	DESARROLLO	31
3.1	Método de diagnóstico por espectro de frecuencia.	31
3.2	Metodología de diagnóstico por espectro de frecuencia de la corriente del estator de los motores de inducción.	32
3.2.1	Medición de la intensidad de la corriente del motor en una cierta condición de deslizamiento y evaluación del estado técnico del motor.....	33
3.2.2	Evaluación y diagnóstico mediante el Análisis espectral de frecuencia de la corriente del estator en Motores eléctricos.....	34
3.2.3	Detección y evaluación de la condición de barras del rotor.....	35
3.2.4	Detección de excentricidad del rotor.....	39
3.2.5	Identificar y evaluar los problemas mecánicos del motor de inducción.	41
3.2.6	Implementación de una aplicación en Matlab para el diagnóstico de fallos en los motores de inducción.	41
3.2.7	Planificar corrección y ejecución de las tareas. Órdenes de trabajo y retroalimentación:	42
3.3	Ensayos experimentales.....	42
3.3.1	Primer experimento.	43
3.3.2	Segundo experimento.....	46
3.3.3	Tercer experimento	48
3.3.4	Acciones dirigidas a los equipos.....	51
3.3.5	Acciones dirigidas al mantenimiento.....	52
3.3.6	Análisis y mejoras de los procesos.....	52
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	54
Referencias.....		56
5.	ANEXOS	59
ANEXO A: Primer experimento.....		59
ANEXO B: Segundo experimento.....		62

ANEXO C: Tercer experimento	65
ANEXO D: Programa para adquisición de datos	69
ANEXO E: Programa en Matlab.....	70

Indice de figuras

Figura 1 Estudio sobre las fuentes de falla en motores eléctricos	5
Figura 2 Desbalance de masa estático.....	8
Figura 3 Desbalance de masa en dos planos.	8
Figura 4 Desbalance por rotor colgante.	9
Figura 5 Forma de producirse la excentricidad estática.	10
Figura 6 Forma de producirse la excentricidad dinámica.....	11
Figura 7 Combinación de excentricidad estática-dinámica.	12
Figura 8 Métodos para diagnosticar estado técnico.	33
Figura 9 señal de corriente	34
Figura 10 Analisis espectral.....	35
Figura 11 tipos de análisis espectral.....	40
Figura 12 aplicación de matlab	42
Figura 13 Representación temporal de la corriente de una fase de una máquina sana.....	44
Figura 14 Representación temporal de la corriente de una fase de una máquina sana.....	47
Figura 15 Espectro de frecuencia tomado del motor de la planta	48
Figura 16 Representación temporal de la corriente de una fase del motor.	49
Figura 17 Frecuencia teórica de excentricidad estática. (plot).....	49
Figura 18 Frecuencia teórica de excentricidad estática. (stem)	50
Figura 19 Motor 2.23 kW con excentricidad estática.	51

INTRODUCCION

TEMA

Metodología para el diagnóstico de fallas en motores de inducción de baja tensión por el espectro de frecuencia de la corriente del estator.

A1. INTRODUCCIÓN

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 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.

Tanto la excentricidad como la rotura de barras en las máquinas de inducción, al someterlas al trabajo continuo pueden 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 estas fallas no son atendidas, se puede originar un rápido deterioro del devanado, las cuales reducen el tiempo de vida útil del motor de inducción, finalizando con un reemplazo de este.

A2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel industrial los motores de inducción son los más utilizados para realizar diferentes procesos productivos, los motores presentan fallas de funcionamiento las cuales no son tan perceptibles a simple vista, pero aun así representan un gran porcentaje de las fallas más comunes, las causas son diferentes ya sea desde una mala instalación, desgastes, fricción, vibraciones, en si existen muchas causas.

Los motores que presentan fallas no siempre salen de funcionamiento debido a que no son perceptibles debido a diferentes factores, las consecuencias de este fenómeno son paros de producción, que pueden ser de un largo periodo el cual representa a nivel industrial una gran pérdida de producción.

Con el desarrollo de la investigación existen métodos con los cuales podemos realizar un análisis de ondas, a través de los años ha surgido el análisis espectral el cual se ha utilizado para análisis cardiográficos, en si se dirige a otro campo que no es la electricidad, pero al lograr realizar una onda de la corriente de un motor podemos optar por realizar un análisis espectral el cual podrá dar excelentes resultados.

EL PROBLEMA

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. Tanto la excentricidad como la rotura de barras en las máquinas de inducción, al someterlas al trabajo continuo pueden 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 estas fallas no son atendidas, se puede originar un rápido deterioro del devanado, las cuales reducen el tiempo de vida útil del motor de inducción, finalizando con un reemplazo de este.

A3. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

Si se cuenta con una caracterización del método de análisis espectral de la corriente del estator es posible la identificación de las principales fallas de orígenes eléctricas y mecánicas, no convencionales, en motores de inducción que operan en las industrias, que no son determinadas por los métodos tradicionales de diagnóstico de fallas para el motor de inducción.

A4. ALCANCE DEL TRABAJO

La metodología actualizada utilizando el espectro de la corriente del estator se plantea como investigación de clasificación, misma que se usara para solucionar el problema que representa la identificación de fallas en motores.

A5. VIABILIDAD DEL TRABAJO

El trabajo que se desea realizar tiene un largo procedimiento, no obstante, la investigación tiene muchos indicios los cuales refleja que se puede realizar la investigación, ya que cuenta con los recursos suficientes para poder realizar.

El procedimiento que se emplea en este tipo de investigación puede ser directamente proporcional al procedimiento, sin embargo, se tiene muy en cuenta que se necesitara crear un modelo estructurado el cual reduce tiempo a la obtención de los resultados de esta investigación.

A6. OBJETIVO GENERAL

- Exponer una metodología para el diagnóstico de fallas en motores de inducción de baja tensión, por el espectro de frecuencia de la corriente del estator. cuando los motores operan en condiciones de carga.

A7. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar una metodología para diagnosticar problemas en los motores de inducción de baja tensión.
- Implementar el diagnóstico por espectro de frecuencia en el Motor de Inducción de baja tensión.
- Exponer el método propuesto a través de un caso de estudio, con su análisis técnico-económico.

MARCO TEÓRICO.

1.1 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 (Arnanz Gómez, Pacheco Sarmentero, & Miguel González, 2017).

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). Estos datos fueron tomados a partir del análisis de máquinas de una gran variedad de potencias (C. J. Verucchi y G. G. Acosta, 2007).

La figura 1 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. (Murillo, 2013)

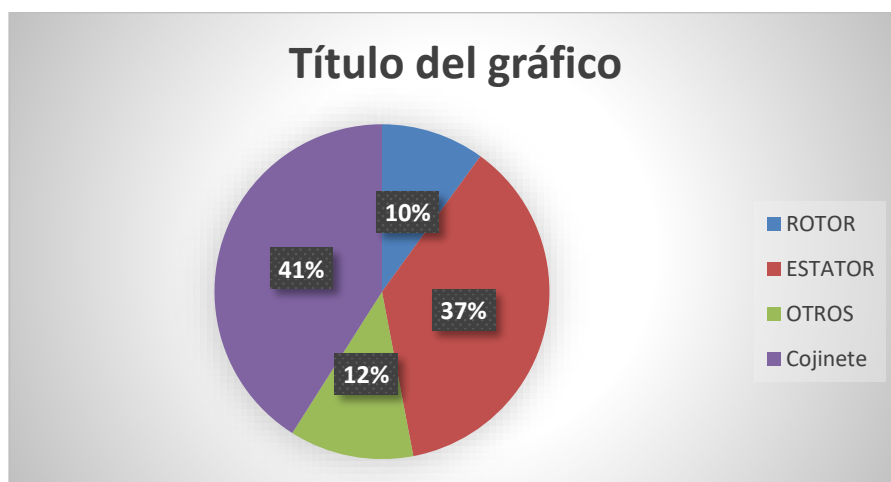


Figura 1 Estudio sobre las fuentes de falla en motores eléctricos

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 (Murillo, 2013).

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 (Villada Duque, Parra, & Guillermo Oc, 2006).

1.2 Fallas en un motor de inducción.

Los motores eléctricos de inducción son pieza fundamental en todo proceso industrial; su robustez, bajo costo, fácil mantenimiento y versatilidad los han hecho populares con aplicaciones que van desde artefactos caseros hasta equipos más sofisticados de tipo industrial (CICB LATINO AMERICA, 2013).

Siendo una máquina eléctrica rotatoria y simple en su constitución física, la clasificación del tipo de fallas puede estar dividida en tres grupos:

- Fallas Mecánicas.
- Fallas Eléctricas.
- Fallas de enlace de potencia.

1.2.1 Fallas Mecánicas

Las fallas mecánicas se pueden dividir en tres partes.

- Desbalance mecánico.
- Fallas en los rodamientos.
- Excentricidad.

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 álabes 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 (BARUCH VERA, 2013).

El desbalance en un motor puede ser de tres tipos:

- Desbalance estático
- Desbalance en dos planos o tipo par.
- Desbalance por rotor colgante.

- 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 $1 \times rps$. Al realizarse las mediciones con los sensores colocados como se muestra en la figura 2 las señales están en fase (Douglier, 2012).

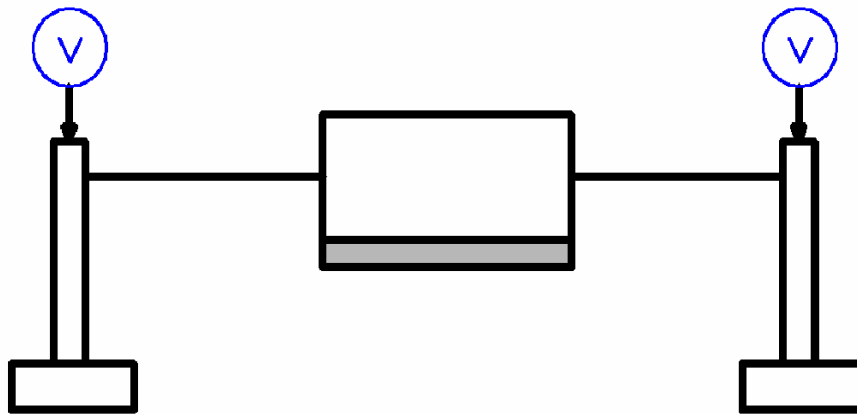


Figura 2 Desbalance de masa estático.

- 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 (Douglier, 2012).

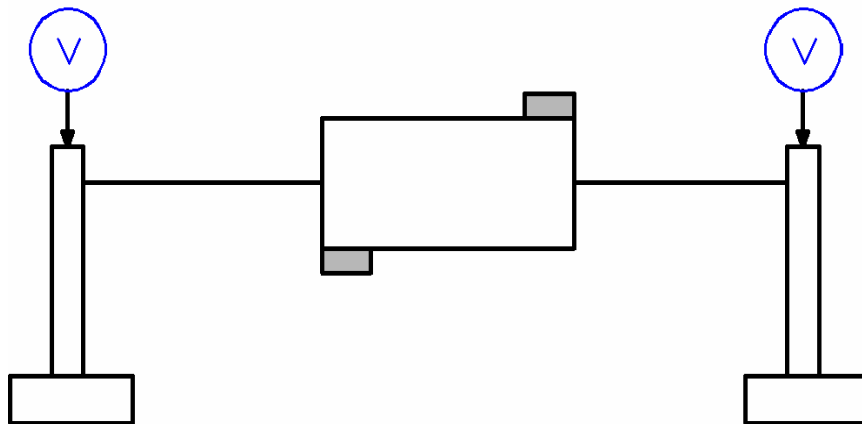


Figura 3 Desbalance de masa en dos planos.

- 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 (Douglier, 2012).

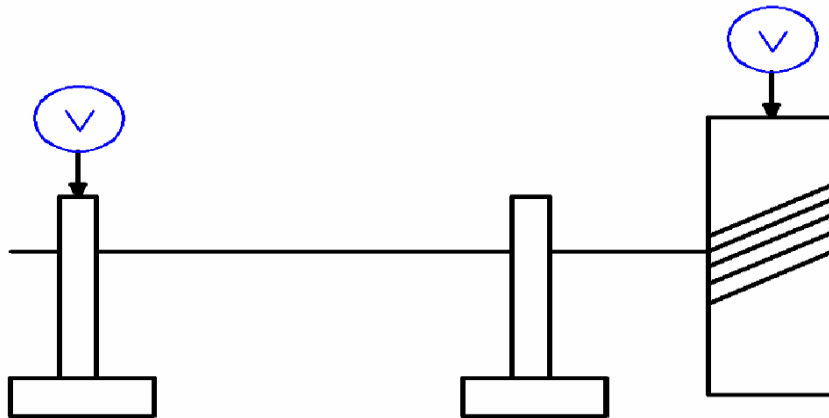


Figura 4 Desbalance por rotor colgante.

1.3 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 (Douglier, 2012).

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) (Douglier, 2012).

1.4 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 (Douglier, 2012).

Existen tres Tipos de Excentricidades:

- Excentricidad de tipo estática.
- Excentricidad de tipo dinámica.
- Excentricidad combinada estática-dinámica.

1.4.1 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 puede estar ocasionado por una forma oval del alojamiento estatórico o por una ubicación incorrecta del rotor dentro del estator tal y como se indica en la figura 1.5 (BARUCH VERA, 2013).

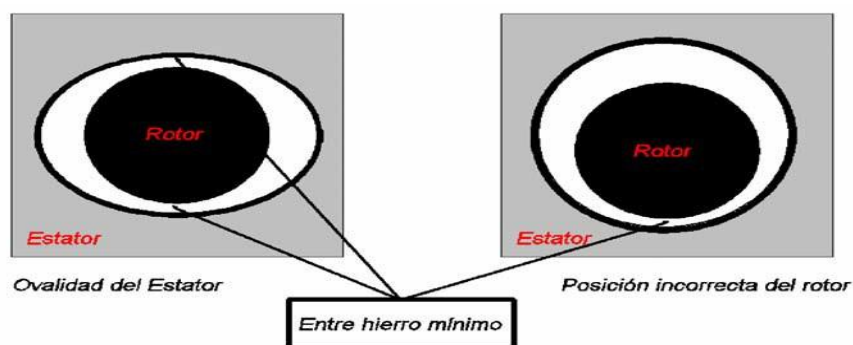


Figura 5 Forma de producirse la excentricidad estática.

1.4.2 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 ilustración 6 se puede observar este tipo de excentricidad (Douglier, 2012).

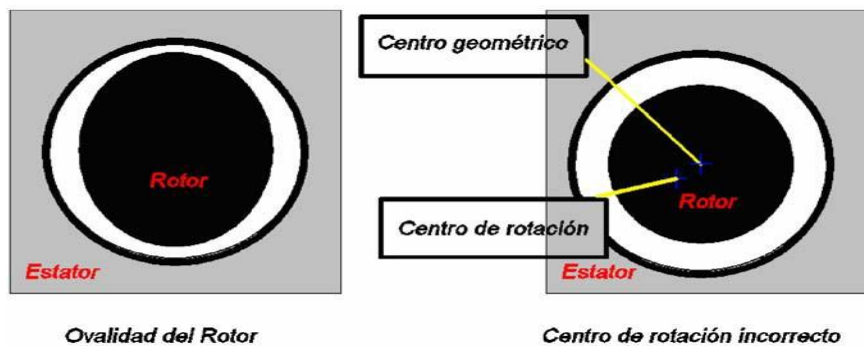


Figura 6 Forma de producirse la excentricidad dinámica.

1.4.3 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 (Douglier, 2012).

En la figura 6 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.

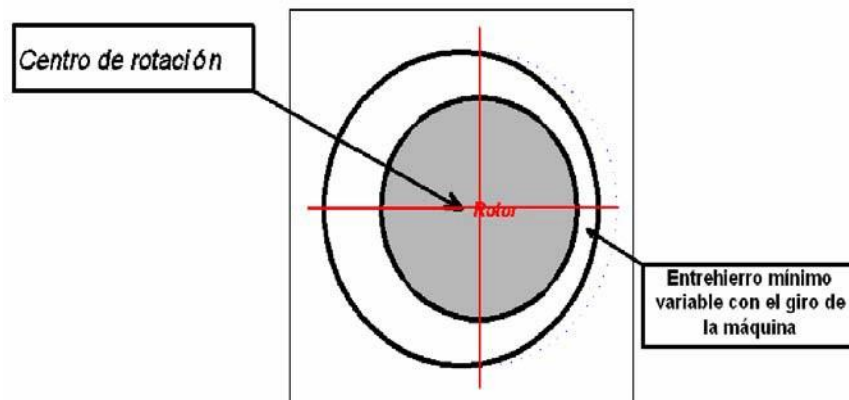


Figura 7 Combinación de excentricidad estática-dinámica.

La excentricidad puede causar daños en el motor debido al golpeo 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 (Douglier, 2012).

1.5 Fallas eléctricas.

Las fallas eléctricas se tratan en realidad de fallas en los aislamientos del motor, que se pueden comprender si se conocen las partes que componen los sistemas de aislamiento, como el aislamiento primario, aislamiento de fase a fase (BARUCH VERA, 2013).

Dentro de las fallas eléctricas podemos encontrar a:

1.5.1 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 (Douglier, 2012).

1.5.2 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 (Arnanz Gómez, Pacheco Sarmentero, & Miguel González, 2017).

1.5.3 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 1% de desbalance de voltajes, puede resultar en un seis a diez por ciento de desbalance en las corrientes (BARUCH VERA, 2013).

1.5.4 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 “switchero” en los circuitos de potencia, descargas eléctricas (rayos), descarga de capacitores y los efectos de dispositivos de estado sólido tales como variadores de frecuencia (Douglier, 2012).

1.5.5 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 termal. Hojas en corto también causarían 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 podían comprometer el aislamiento de las láminas (SMEATON, 2011).

1.6 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 (Palomino Marín , 2015).

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 (Palomino Marín , 2015).

1.7 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 (Palomino Marín , 2015).

1.8 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 (Palomino Marín , 2015).

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 aún cuando se balancee el sistema (Palomino Marín , 2015).

1.9 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 (Palomino Marín , 2015).

1.10 Fallas de enlace de potencia.

1.11.1 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 (Lémoli, 2015).

1.11.2 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 2x rps en algunos casos de 3 x rpm con un desfase de 180° con la vibración radial en el acoplamiento (CICB LATINO AMERICA, 2013).

1.11.3 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 (SINAIS, 2013).

1.11.4 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 (SINAIS, 2013).

1.11.5 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 (SINAIS, 2013).

1.11.6 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 (SINAIS, 2013).

1.11.7 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 (A-MAQ S.A., 2013).

1.11.8 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 bandeamiento lateral alrededor de la frecuencia natural de vibración (f_n) del engrane defectuoso. El espaciado de las bandas laterales es $1X$ rps del engrane defectuoso (A-MAQ S.A., 2013).

1.11.9 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 seria muy diferente de los demás pulsos. Naturalmente, la diferencia de tiempo entre esos pulsos seria igual al periodo de la velocidad de giro del engranaje (el diente engrana una vez por cada revolución) (Douglier, 2012).

1.11.10 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 (A-MAQ S.A., 2013).

1.11.11 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 (MEDRANO MARQUÉZ, LEVÍ GONZALES, & DÍAZ, 2017).

1.12 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 (Díaz, Díaz, Amaya, & Palacios, 2010).

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 (Díaz, Díaz, Amaya, & Palacios, 2010).

Entre este tipo de pruebas están:

Los ensayos con tensión continua, tales como, la prueba del 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 (Palomino Marín , 2015).

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.

1.13 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 (Villada Duque, Parra, & Guillermo Oc, Estudio del comportamiento de motores de inducción ante fallas estatóricas, 2006).

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 (Villada Duque, Parra, & Ocampo, Estudio del comportamiento de motores de inducción ante fallas estatóricas, 2006).

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 (Villada Duque, Parra, & Guillermo Oc, Estudio del comportamiento de motores de inducción ante fallas estáticas, 2006).

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.

1.14 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 (ANTELIZ JAIMES , 2009).

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 (ANTELIZ JAIMES , 2009).

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 (ANTELIZ JAIMES , 2009).

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.

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

En el caso específico de un cortocircuito entre espiras, ocurre una modificación del circuito eléctrico que ocasiona un cambio subsecuente de la densidad de flujo en el entrehierro de la máquina (Díaz, Díaz, Amaya, & Palacios, 2010).

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 (Díaz, Díaz, Amaya, & Palacios, 2010).

Los armónicos de interés para el cortocircuito entre espiras del estator están dados por:

$$(k \pm n) \frac{(1-s)}{p} f \quad (1.1)$$

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:

$$K * (f \pm n) * fr \quad (1.2)$$

Donde:

fr : 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 (Villada Duque, Parra, & Guillermo Oc, Estudio del comportamiento de motores de inducción ante fallas estatísticas, 2006).

1.14.1 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, 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 (Díaz, Díaz, Amaya, & Palacios, 2010).

1.14.2 Par electromagnético.

El par electromagnético es otro de los métodos nuevos y no convencionales de diagnóstico de fallas en las máquinas rotativas que buscan evitar la parada y desmontaje de la máquina. El par es generado cuando una serie de armónicos en las fuerzas magnetomotrices del rotor y el estator interactúan. Algunas de esas componentes interactúan y generan par motriz mientras las otras solo generan fuerzas pulsantes que producen variaciones en la velocidad.

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

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

Mediante el vibrómetro mide nivel total de vibraciones y no se puede realizar análisis espectral para identificar los problemas, aunque 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 de 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.

1.14.3 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 milivoltios, 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 (Castelli, 2008).

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 el Tabla se realiza una comparación entre los principales métodos de detección de fallos, indicando las fallas que los mismos pueden detectar (Castelli, 2008)

Fallas que puede detectar				
Método	Cortocircuit 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				

Tabla 1 comparacion entre los principales metodos de deteccion de fallos

Analizando la Tabla1 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 del espectro de frecuencia de la señal muestreada (Castelli, 2008).

CAPÍTULO II

2. METOLOGIA DE INVESTIGACION Y DESARROLLO DEL ESTUDIO

2.1 Tipos de Investigación.

La investigación de este proyecto es de tipo bibliográfico, de campo y aplicada, las mismas que permitirán desarrollar el proyecto cumpliendo las necesidades que este requiere.

2.1.1 Investigación documental o bibliográfica.

La investigación del proyecto se desarrolló con el método de investigación bibliográfica la misma que permitió la recopilación de la información de una manera metodológica, teórica y tecnológica obtenida de documentos, libros y de páginas virtuales en la red.

Este tipo de investigación permitió la construcción del marco teórico obteniendo recopilación de datos y antecedentes de los principales tipos de energía y sobre todo las principales características de las fallas de motores a nivel industrial.

2.1.2 Investigación de campo.

La investigación del proyecto se enmarco en un estudio de campo que nos ayudó a recopilar información real del tipo de fallas que los motores adquieren en diferentes situaciones de trabajo.

2.2 Métodos.

Los métodos que se aplicaron en la investigación son: deductivo, analítico, sintético y experimental.

2.2.1 Método deductivo.

El método deductivo se aplicó en la recopilación de la información teórica, obtenida de fuentes como documentos, revistas, textos y páginas de internet con la cual se estructuró el marco teórico utilizada como fundamento en el análisis de la investigación.

2.2.2 Método inductivo.

El método Inductivo se utilizó principalmente para identificar situaciones particulares en el transcurso de la investigación realizando comparaciones entre hechos y aspectos observados en la recopilación de la información sobre fallas de motores de inducción y la utilización de los instrumentos de medida que permitieron generar conclusiones sobre el problema investigado.

2.2.3 Método analítico.

El método analítico se aplicó en el escogimiento minucioso de la información bibliográfica, de campo y aplicada, con la finalidad de identificar características, causas y consecuencias que nos permitan dilucidar de mejor manera la información obtenida para la realización de la propuesta.

2.2.4 Método sintético.

El método sintético se aplicó en la obtención de los resultados de la investigación de manera esquemática mediante el estudio de los aportes de las diferentes fuentes de información.

De esta manera el método sintético se plasma en la elaboración de resúmenes, esquemas, conclusiones y sobre todo el diseño de esquema de experimentación, además en la elaboración de la propuesta.

2.2.5 Método experimental.

El método experimental en la propuesta está basado en todas las prácticas de prueba y verificación, resultados registrados a medida que las pruebas realizadas nos exigían para llegar de manera óptima al funcionamiento del sistema para identificación de fallas en los motores de inducción mediante la aplicación realizada en matlab.

El método experimental es el resultado de todo el proceso de campo y aplicada, como fase previa al método experimental en donde se realizó pruebas de funcionamiento, mediciones y recolección de datos de campo con su correspondiente análisis.

2.3 Técnicas e instrumentos

Las técnicas utilizadas en la investigación son las siguientes:

La técnica de observación es una técnica de investigación que consiste en observar personas, objetos, fenómenos, hechos, situaciones, casos, acciones, con el fin de obtener determinada información necesaria para una investigación. Esta técnica se suele utilizar principalmente para observar el comportamiento de los beneficiarios o usuarios, para poder usar esta técnica, en primer lugar, debemos fijar nuestro objetivo o razón de investigación y, en segundo lugar, determinar la información que vamos a recabar, la cual nos permitirá cumplir con nuestro objetivo.

La observación de campo se realizó en la fase de investigación diagnóstica, para la recolección de datos mediante la investigación aplicada, para finalmente a través de la fase experimental identificar los valores de las variables que nos permitan obtener el funcionamiento correcto del sistema de control de dichas variables.

CAPITULO III

3. DESARROLLO

3.1 Método de diagnóstico por espectro de frecuencia.

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.

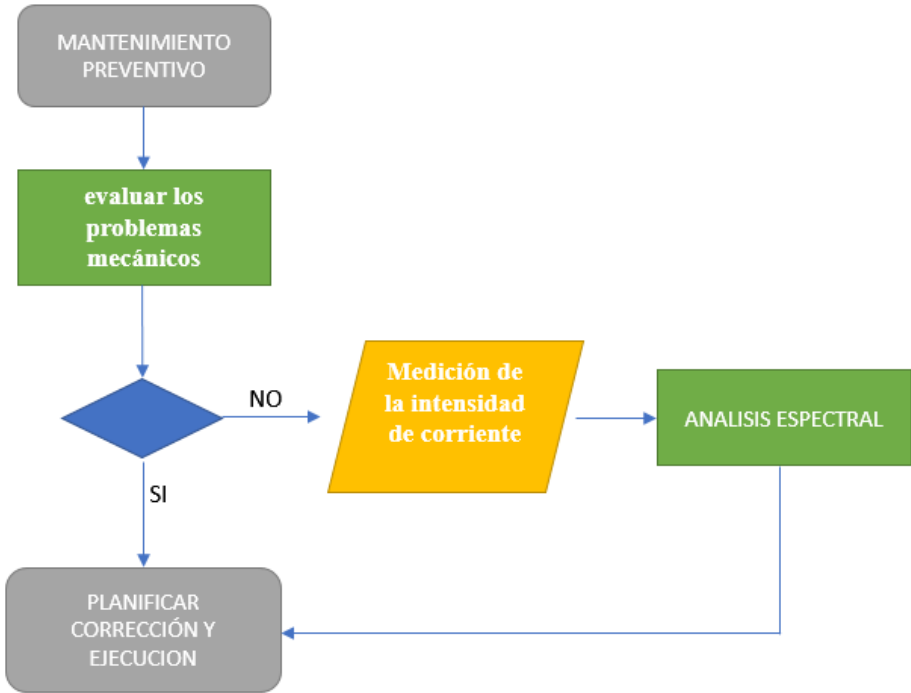
El espectro de frecuencias o descomposición espectral de frecuencias puede aplicarse a cualquier concepto asociado con frecuencia o movimientos ondulatorios. Un proceso que cuantifique las diversas intensidades de cada frecuencia se llama análisis espectral. Matemáticamente el análisis espectral está 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 utilizaremos este método en fallas tales como excentricidad y barras rotas.

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

A continuación, 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:



3.2.1 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 de este y la posible aparición de desperfectos, se define el estado técnico, en la figura siguiente se muestran las principales formas:

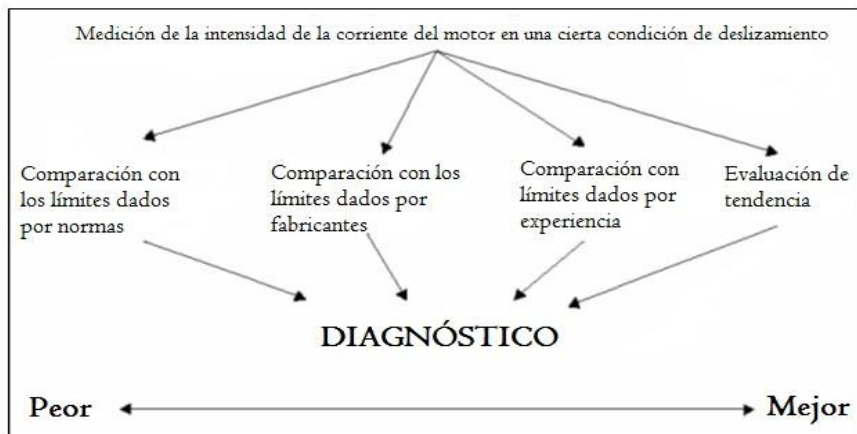


Figura 8 Métodos para diagnosticar estado técnico.

En la figura 8 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.

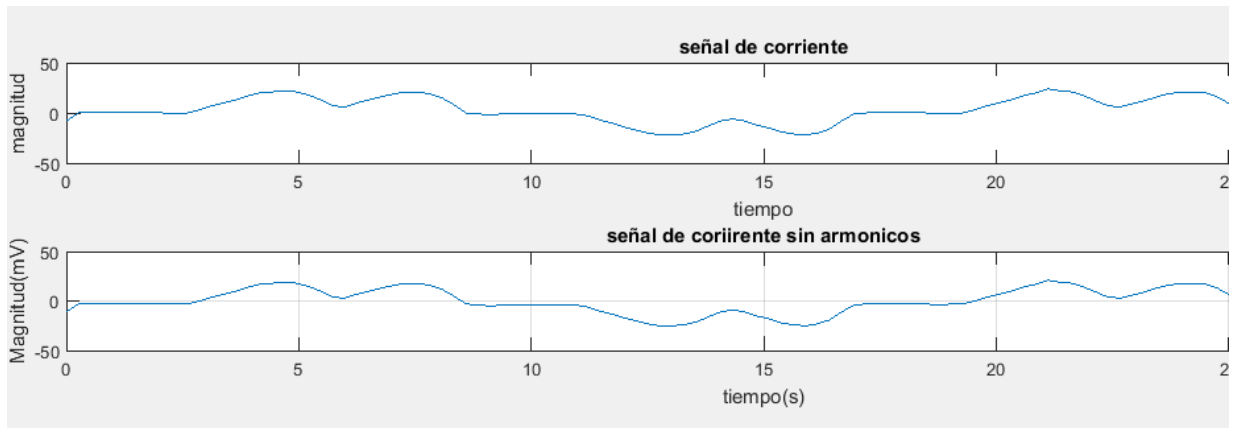


Figura 9 señal de corriente

3.2.2 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 evalúan dos fallas de gran importancia en el motor de inducción. Estas son:

- Roturas de barras del rotor.
- Excentricidad.

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

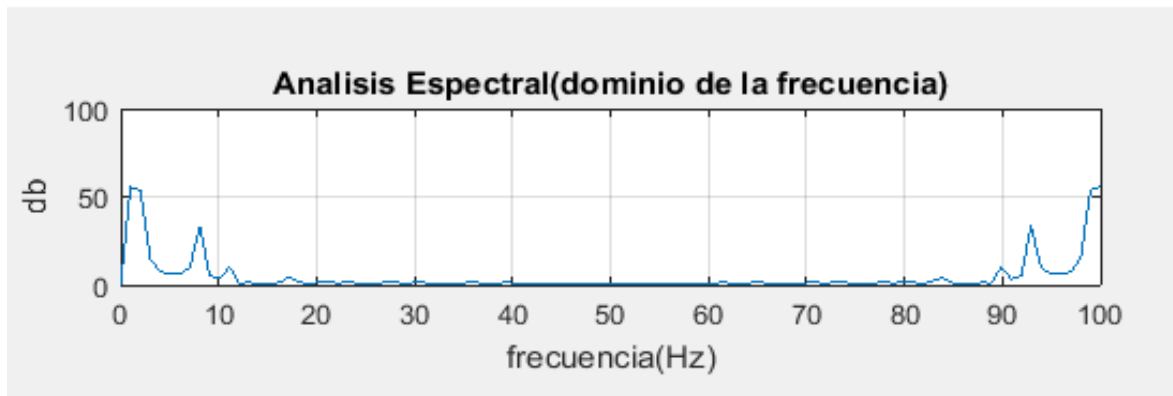


Figura 10 Analisis espectral

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

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

$$f_1 = N_s * p \quad (2.1)$$

Donde:

p =número de pares de polo,

f_1 = frecuencia de alimentación de las bobinas del estator (Hz), N_s = Velocidad de sincronismo (rev/seg).

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

Definiendo el deslizamiento del rotor como:

$$s = (N_s - N_r)/N \quad (2.2)$$

Con: N_r = Velocidad del rotor Entonces,

$$\begin{aligned} f_2 &= (N_s - N_r) * p \\ f_2 &= s * N_s * p \end{aligned} \quad (2.3)$$

Siendo: f_2 = Frecuencia de la corriente del rotor

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

$$N_r + N_2 = N_1 + N_s - N_r = N_s \quad (2.4)$$

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

$$N_s - N_r = s * N_s \quad (2.5)$$

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

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

$$N_b = N_r - (s * N_s) \quad (2.6)$$

Siendo:

$$\begin{aligned} s &= (N_s - N_r) / N_s \\ N_r &= N_s(1 - s) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Por lo tanto:

$$N = N_s - 2 * s * N_s \quad (2.8)$$

Expresándolo en términos de:

- frecuencia (f_b)
- Número de pares de polos

$$f_b = (N_s - 2 * s * N_s) * p$$

$$f_b = \left(\frac{f_1}{p} - 2 * s * \frac{f_1}{p} \right) * p$$

$$f_b = f_1(1 - 2 * s) \quad (2.9)$$

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

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

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

$$f_b = f_1(\pm 2 * s) \quad (2.10)$$

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

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

Algunas cargas que presentan pares pulsantes (tales como los compresores) pueden provocar bandas laterales similares a las producidas por un fallo e interferir en el diagnóstico. La práctica indica que una diferencia de 60 dB o más indica un motor en buen estado. Al comenzar el deterioro la amplitud de las bandas laterales aumenta.

Cuando la diferencia es del orden de 48 dB existen conexiones de alta impedancia y si se llega a 35 dB existirán varias barras rotas. En la tabla siguiente se muestran algunos valores usados como criterios de evaluación del grado de deterioro:

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

Tabla 2 Criterios de evaluación del grado deterioro del rotor en función de Frecuencia de línea/Frecuencia de paso de polos (Fl/Fp).

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

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

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

3.2.4 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 a 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:

$$g(\alpha, t) = g * (1 * \text{escos } \alpha - e \text{dcos}(t - \alpha)) \quad (2.11)$$

Donde:

g =Longitud del entrehierro

e_s = Excentricidad estática

e_d = Excentricidad dinámica

ω = Velocidad angular

α = Distancia angular alrededor del entrehierro

La frecuencia patrón de la excentricidad es:

$$f_{ec} = [f_1[(r \pm nd) * \left(1 - \frac{s}{p}\right) \pm nws] \quad (2.12)$$

Donde:

f_{ec} = frecuencia de excentricidad

f_1 = frecuencia de alimentación

r = número de ranuras

$nd=\pm 1$ $nws=1,3,5,7$

s =deslizamiento

p = número de pares de polos

Con $nd=0$ esta fórmula da la clásica frecuencia de paso de las ranuras del rotor. Con $nd=\pm 1$ 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.

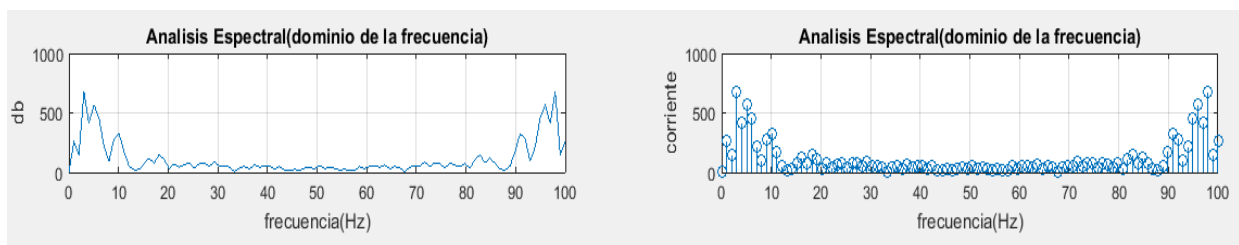


Figura 11 tipos de análisis espectral

3.2.5 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.

3.2.6 Implementación de una aplicación en Matlab para el diagnóstico de fallos en los motores de inducción.

Con la ayuda del Matlab, herramienta importante en nuestra carrera se no 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 grafos 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.

```

%señal sin ruido para esto se resta la señal menos la media de la misma
%señal
ecg2=ecg-mean(ecg);
figure(2);
subplot(4,1,2);
plot(t,ecg2);
grid;
xlabel('tiempo(s)');
ylabel('Magnitud(mV)');
title('Grafico en función del tiempo sin componente DC(ruido)');
%Análisis espectral con plot
fs=100
muestras=length(ecg2);
ordenadas=fft(ecg2,muestras);
ordenadas=abs(ordenadas);
abscisas=linspace(0,fs,muestras)
figure(1);
subplot(4,2,1);
plot(abscisas,(0.10*ordenadas));
grid;
xlabel('frecuencia(Hz)');
ylabel('Magnitud');
title('Análisis Espectral(dominio de la frecuencia)');

```

Figura 12 aplicación de matlab

3.2.7 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.

3.3 Ensayos experimentales.

3.3.1 Primer experimento.

Los experimentos consisten en la aplicación de la metodología de diagnóstico a diferentes motores a nivel industrial. El diagnóstico utilizando la técnica de análisis espectral de frecuencia de la corriente del estator se puede realizar con motor en funcionamiento mostrando su validez y ventaja respecto a las utilizadas actualmente. Se eligieron motores de diferentes velocidades y potencias. De las muchas pruebas realizadas se eligieron tres ejemplos a manera de exposición de los ejercicios experimentales.

Como primera muestra, se cita el ensayo realizado en 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 una planta industrial.

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 turbomáquinas, 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.

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 13, se representa la corriente estatórica de una máquina eléctrica sana en función del tiempo.

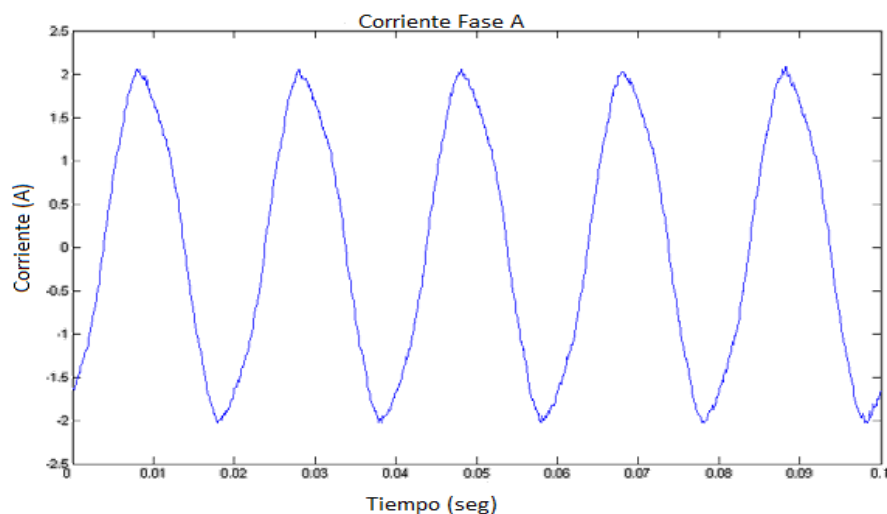


Figura 13 Representación temporal de la corriente de una fase de una máquina sana.

Como se observa en la figura 13, 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.

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 60 Hz.

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

En la figura13 se representa el espectro en frecuencia de la corriente que circula por los devanados del estator representada en la figura 12 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.

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.

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 son excentricidad y barras del rotor rotas.

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.

3.3.2 Segundo experimento

Se expone de forma más resumida otro ensayo realizado a un motor de la planta experimental, de 15 kW de potencia y 1740 rpm. Este ventilador centrífugo PF- 4 tiene la función de garantizar el régimen aerodinámico necesario en el circuito para el transporte neumático. Una avería en el mismo afecta la producción en un 50%.

La adquisición de datos fue tomada debido a un ruido existente en el motor, lo cual indicaba un estado técnico no aceptable.

Características técnicas del motor centrífugo PF- 4

- Presión estática, 450 mm col H₂O.
- Velocidad del rodete, (1800 rpm)

- Diseño, 7000 m³/h
- Suministro, España.
- Características del motor, 440 V; 25 A; 1740 rpm, 15 kW.
- Construcción, Acero regular
- La transmisión es MOTOR-POLEAS-CORREAS

Una vez adquirida la corriente de una fase del estator y comparándolas según lo explicado en la figura 14, se representa la misma en función del tiempo obteniendo una senoide mostrando el estado del motor.

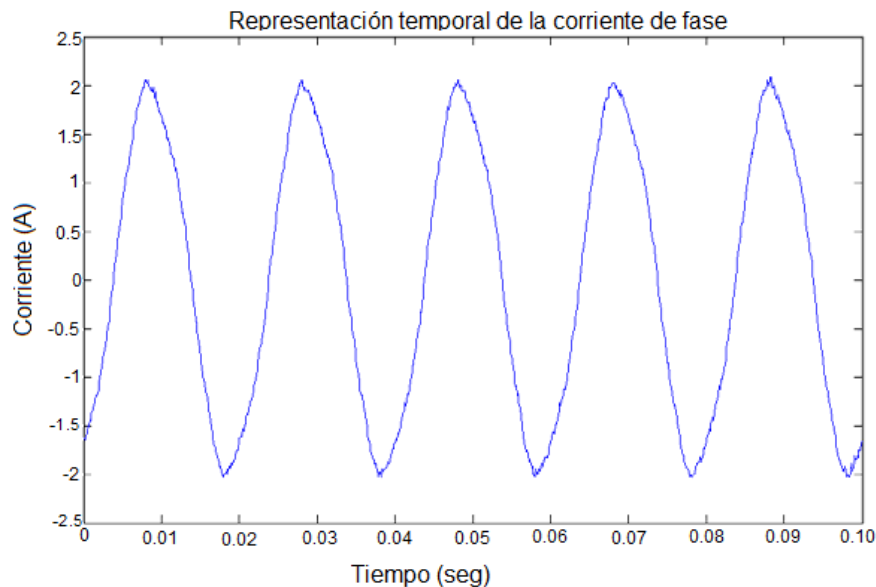


Figura 14 Representación temporal de la corriente de una fase de una máquina sana.

Como se observa en la ilustración 13, 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 estática, se observa a través de su espectro las componentes que conforman dicha corriente.

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

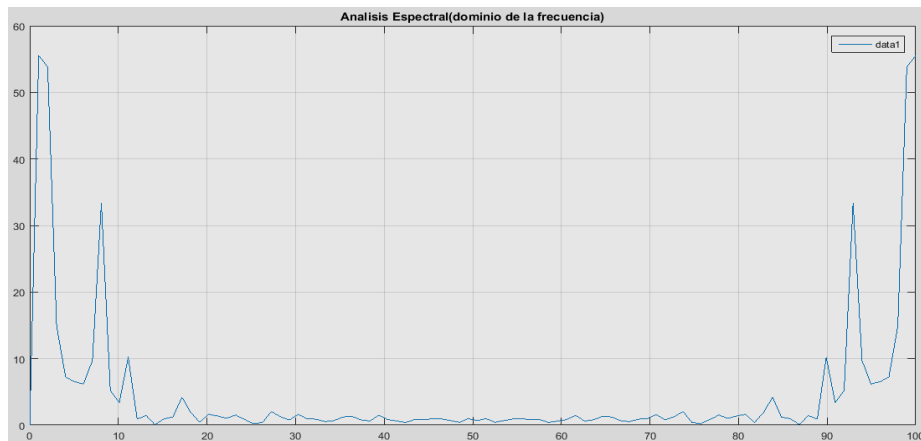


Figura 15 Espectro de frecuencia tomado del motor de la planta

En la figura 15 se representa el espectro frecuencial de la corriente del estator que posee algún fallo o anomalía. El pico central se encuentra a la frecuencia de giro de la máquina, los otros picos dependen de la frecuencia del fallo, que en este caso es barra del rotor rota. Al evaluar el estado del rotor por la tabla de criterios se puede percibir que existen varias barras agrietadas o rotas ya que la amplitud oscila entre 20 y 36(dB), por lo que la acción recomendada es reparar.

3.3.3 Tercer experimento

Se tiene el motor de 2,23 kW, con accionamiento en bombas PB-315 B. 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 16 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.

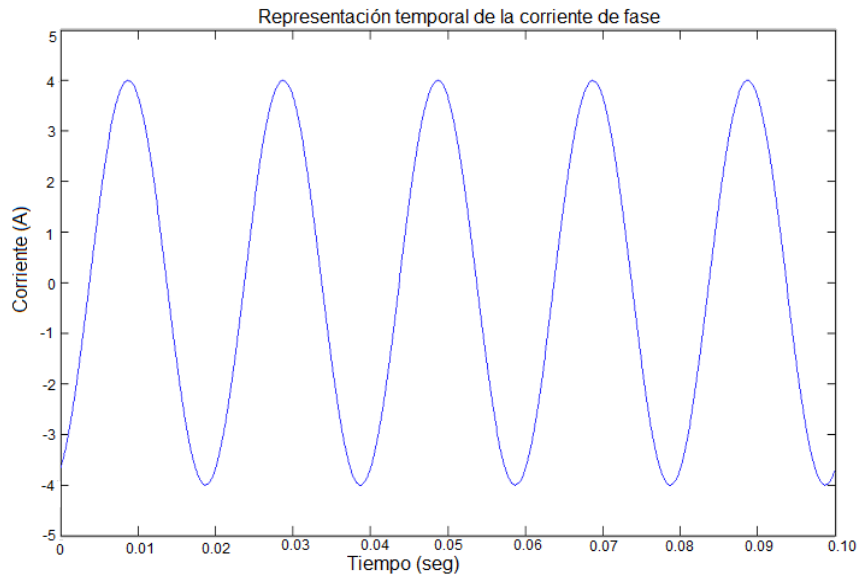


Figura 16 Representación temporal de la corriente de una fase del motor.

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.

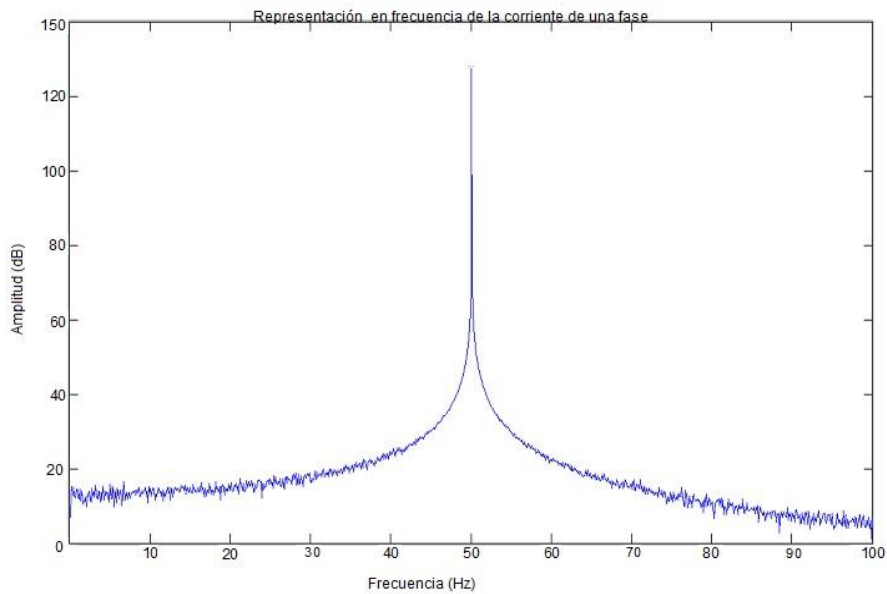


Figura 17 Frecuencia teórica de excentricidad estática. (plot)

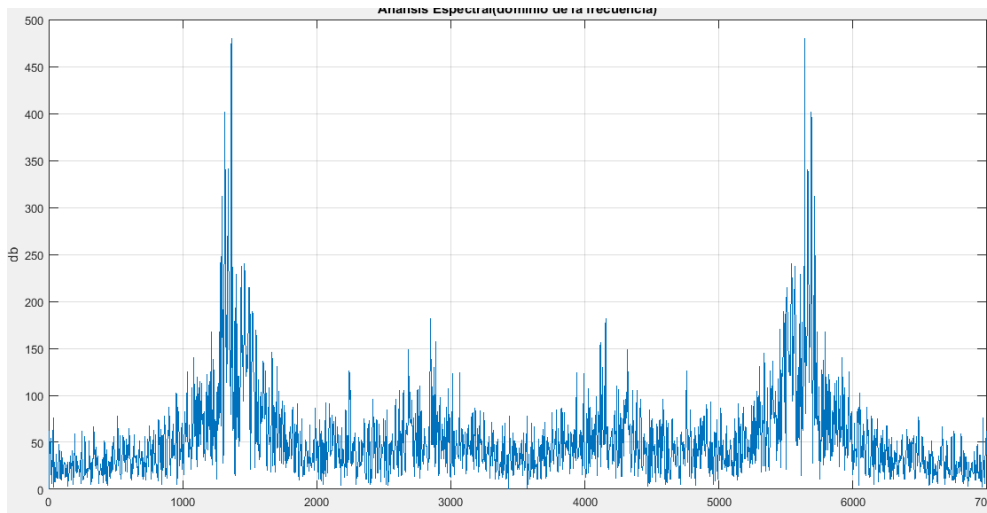


Figura 18 Frecuencia teórica de excentricidad estática. (stem)

Tabla3: Frecuencia teórica de excentricidad estática.

Frecuencias Teóricas festática= $[(k*N)*(1-s/p) \pm nws]*f$		
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

Tabla4: Frecuencia teórica de excentricidad dinámica.

Frecuencias Teóricas fdinámica= $[(k*N \pm nd)*(1-s/p) \pm nws]*f$			
K=1	nd=1	f=951.87 Hz	f=774 Hz
K=1	nd=2	f=980.64 Hz	f=745.56 Hz
K=1	nd=3	f=1009.3 Hz	f=716.4 Hz
K=1	nd=4	f=1038.18 Hz	f=688.02 Hz
K=1	nd=5	f=1066.8 Hz	f=658.8 Hz

A continuación, se presenta la Figura 19, donde apreciar 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.

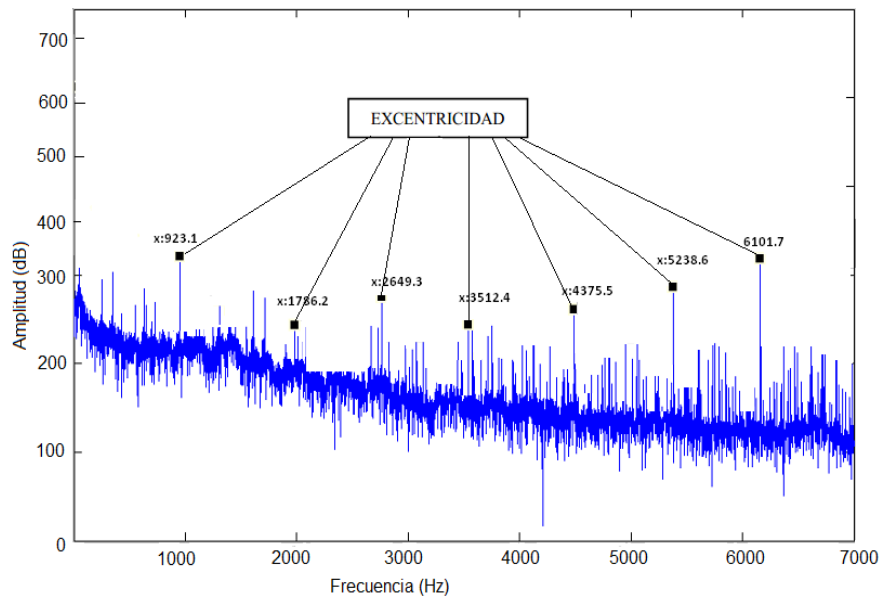


Figura 19 Motor 2.23 kW con excentricidad estática.

3.3.4 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.

3.3.5 Acciones dirigidas al mantenimiento.

- Identificar las acciones de mantenimiento a ejecutar con riesgos de impacto, 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.
- 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.

3.3.6 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:

- Coordinar y obtener autorización del jefe de mantenimiento de la planta y de seguridad industrial, para realizar cualquier operación.
- Observar y cumplir todas las medidas de seguridad e higiene del trabajo establecido en la planta donde se realice el diagnóstico.
- El técnico de mantenimiento que realizará la inspección se hará acompañar por algún personal de mantenimiento de la planta.
- Como las mediciones se realizan con el equipo en operación, tomar todas las medidas de precaución antes y durante la colocación de los sensores.
- Establecer acciones proactivas mediante procedimientos documentados para la eliminación de las causas que originan los impactos medioambientales.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez terminado el desarrollo del programa y la recolección de datos y después de realizar diagnóstico de fallas en motores de inducción de baja tensión por el espectro de frecuencia he llegado a poder concluir lo siguiente:

4.1 CONCLUSIONES

- La metodología para diagnosticar motores de inducción es ventajosa para identificar las fallas de barras rotas y excentricidad en los motores de inducción de baja tensión.
- La visualización de los espectros de frecuencia empleando Matlab como herramienta de apoyo, realiza el diagnóstico de los motores de inducción permite determinar los rangos en los cuales las fallas pueden ser claramente apreciadas.
- Para realizar el análisis espectral realizamos el cambio del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia logrando así el espectro resultante gracias a la transformada rápida de Fourier.
- Una de las principales características de las barras rotas se puede encontrar en el nivel de desibels que puede llegar cada espectro de frecuencia comprobando el nivel entre <35 db representa una barra rota o algunas barras rotas.
- Se realiza un análisis espectral para la detección de excentricidad elevando la frecuencia hasta un valor de 7000 Hz para verificar la excentricidad en el motor notando picos altos, a través de la uniformidad de la señal.

4.2 RECOMENDACIONES

- Realizar la adquisición de datos con un número de 100 muestras por segundo. Se demuestra en este trabajo de manera experimental que es el número de muestras óptimo para el análisis de las señales de corriente.
- Utilizar la herramienta Simulink de Matlab para lograr en la simulación características más exactas al motor con que se realizan los experimentos prácticos.
- Para que no afecten en el análisis espectral, reducir los armónicos existentes, mediante un filtro colocado directamente en la adquisición de datos de datos.
- Siempre que se realicen estas pruebas en laboratorio tener precaución y considerar las medidas de seguridad necesarias.

Referencias

Lémoli, M. (2015). Desbalance y desalineación en motores eléctricos. *Motortico*.

Villada Duque, F., parra, d., & guillermo oc. (29 de octubre de 2006). *Estudio del comportamiento de motores de inducción ante fallas estatóricas*. Obtenido de red de revistas científicas de américa latina y el caribe, españa y portugal: <http://www.redalyc.org/html/430/43004006/>

A-MAQ S.A. (2013). Equipos de medición y análisis de vibraciones –servicios – soluciones especiales. *Equipos de medición y análisis de vibraciones*.

Anteliz jaimes , A. (2009). El flujo de dispersión magnético como herramienta de análisis para detección de fallas en motores de inducción mediante técnicas de análisis espectral . *Gerenc. Technol. Inform.*

Arnanz Gómez, R., Pacheco Sarmentero, M., & Miguel González, I. (30 de noviembre de 2017). *Detección de fallos en motores de corriente alterna*. Obtenido de instituto de tecnologías avanzadas de la producción. Universidad de valladolid: www.unicauca.edu.co/

Baruch Vera, a. (2013). *Diagnóstico de fallas en motores eléctricos de inducción trifásicos tipo jaula de ardilla usando redes neuronales artificiales*. Xalapa.

C. J. Verucchi y G. Acosta. (Marzo de 2007). Obtenido de técnicas de detección y diagnóstico de fallos en máquinas eléctricas de inducción: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4444532>

Castelli, M. (2008). Metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos de inducción. *Universidad de montevideo*.

Chapman, S. J. (2012). *Máquinas eléctricas* (vol. Quinta edición). (p. E, & r. Vázquez, edits.) Monterrey, mexico: the mcgraw-hill.

Cicb Latino America. (agosto de 2013). *Fallas del motor de inducción*.

Díaz, D., Díaz, R., Amaya, M. C., & Palacios, j. (2010). Análisis del cortocircuito entre espiras de un motor de inducción tipo jaula de ardilla mediante la aplicación del método de elementos finitos (mef). *Scielo*.

Douglier. (02 de diciembre de 2012). *Slideshare*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/douglier/capitulo2-15458918>

Harper, E. (2009). *Manual del tecnico en mantenimiento electrico* . España: Limusa.

Medrano Marquéz, j. A., Leví Gonzales, v., & Díaz, v. (2017). *Tecnicas y aplicaciones industriales* . Mexico: grupo editorial patria .

Murillo, W. (2013). *Mantenimiento predictivo para motores eléctricos*.

Palomino Marín , E. (30 de diciembre de 2015). Acerca del diagnóstico vibroeléctrico de los motores de inducción. *Experiencias del ceim – cujae*.

Sinais. (2013). Sinais ingenieria de mantenimiento. *Sinais*.

Smeaton, R. W. (2011). *Motores electricos seleccion mantenimiento y reparacion* . Mexico, df: mcgraw-hill.

Villada Duque, F., Parra, D., & Ocampo, G. (2006). Estudio del comportamiento de motores de inducción ante fallas estatóricas. *Redalyc*.

White, G. (2009). *Introducción al análisis de vibraciones*. Woburn: azimadli.

5. ANEXOS

ANEXO A: Primer experimento

Las mediciones del primer experimento fueron tomadas de pruebas realizadas al motor en vacío, 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 de la corriente del estator.

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 ka 3 4
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	Ia	Ib	Ic	Va	Vb	Vc	#	Time	Ia	Ib	Ic	Va	Vb	Vc
-	(ms)	(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	-	(ms)	(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)
1	0.00	-8	-1	11	-67	-132	459	51	13.03	-22	23	0	-334	280	141
2	0.26	0	-4	5	-32	-162	452	52	13.29	-21	21	1	-336	260	181
3	0.52	1	-6	6	0	-190	441	53	13.55	-18	17	1	-334	237	223
4	0.78	1	-10	10	28	-215	426	54	13.81	-13	12	2	-325	213	262
5	1.04	1	-14	13	63	-239	403	55	14.07	-8	4	4	-313	186	294
6	1.30	1	-17	17	98	-262	378	56	14.33	-6	0	7	-301	153	324
7	1.56	1	-21	20	134	-281	352	57	14.59	-8	0	10	-283	125	353
8	1.82	1	-22	22	167	-297	325	58	14.85	-12	0	13	-262	93	380
9	2.08	0	-22	22	193	-311	288	59	15.11	-15	0	16	-243	60	403
10	2.35	0	-19	19	223	-327	251	60	15.37	-19	-1	20	-220	26	422
11	2.61	0	-14	13	248	-336	213	61	15.64	-21	-3	22	-192	-4	434
12	2.87	3	-8	4	267	-338	174	62	15.90	-22	-1	23	-164	-37	445
13	3.13	7	-6	-2	280	-339	130	63	16.16	-20	-1	21	-134	-72	459
14	3.39	10	-8	-1	301	-336	84	64	16.42	-16	-1	17	-100	-107	459
15	3.65	13	-12	-1	310	-329	37	65	16.68	-8	-2	11	-69	-137	456
16	3.91	17	-16	0	315	-322	-7	66	16.94	-1	-4	5	-35	-165	452
17	4.17	20	-20	0	327	-311	-56	67	17.20	0	-6	6	-2	-192	443
18	4.43	21	-21	0	336	-295	-98	68	17.46	1	-10	10	32	-213	427
19	4.69	22	-22	0	338	-281	-139	69	17.72	1	-13	13	56	-239	405
20	4.95	21	-20	0	338	-260	-181	70	17.98	1	-17	17	91	-260	382

21	5.21	18	-16	-3	336	-236	-223	71	18.24	1	-21	20	130	-280	353
22	5.47	13	-11	-2	334	-213	-262	72	18.50	0	-23	22	164	-295	320
23	5.73	7	-3	-4	317	-185	-295	73	18.76	-1	-22	22	193	-308	288
24	5.99	6	0	-6	301	-157	-325	74	19.02	0	-19	19	222	-322	251
25	6.25	10	1	-10	283	-125	-355	75	19.28	0	-14	14	246	-336	216
26	6.51	13	1	-13	264	-91	-376	76	19.54	3	-8	6	266	-341	176
27	6.78	16	1	-16	241	-56	-399	77	19.80	7	-6	-2	288	-341	134
28	7.04	19	1	-19	218	-25	-420	78	20.07	10	-8	-1	299	-338	86
29	7.30	21	2	-21	192	0	-436	79	20.33	13	-12	-1	310	-332	40
30	7.56	21	2	-22	164	37	-445	80	20.59	17	-15	-1	318	-324	-5
31	7.82	19	1	-21	127	74	-454	81	20.85	20	-19	0	327	-311	-60
32	8.08	15	1	-16	97	109	-459	82	21.11	24	-21	0	336	-297	-97
33	8.34	8	2	-10	67	139	-457	83	21.37	22	-22	0	338	-280	-135
34	8.60	0	5	-4	35	165	-452	84	21.63	21	-20	0	338	-266	-179
35	8.86	-1	6	-5	2	192	-438	85	21.89	17	-16	-1	334	-243	-222
36	9.12	-2	10	-8	-30	215	-420	86	22.15	12	-11	-1	325	-215	-257
37	9.38	-1	13	-12	-63	241	-401	87	22.41	7	-3	-4	310	-186	-292
38	9.64	-1	17	-15	-97	266	-378	88	22.67	6	1	-7	301	-158	-324
39	9.90	-1	20	-19	-130	280	-350	89	22.93	9	0	-10	287	-127	-353
40	10.16	-1	22	-21	-160	295	-320	90	23.19	12	1	-13	262	-91	-380
41	10.42	-1	21	-20	-190	311	-285	91	23.45	16	1	-16	241	-60	-406
42	10.68	-1	18	-17	-220	325	-251	92	23.71	19	1	-20	220	-28	-422

43	10.94	-1	13	-12	-248	334	-215	93	23.97	21	1	-22	195	-2	-436
44	11.21	-3	8	-4	-267	338	-172	94	24.23	21	1	-23	165	33	-447
45	11.47	-7	6	2	-283	341	-127	95	24.50	20	2	-20	135	72	-454
46	11.73	-10	8	2	-299	336	-84	96	24.76	16	2	-16	97	107	-459
47	11.99	-14	13	1	-310	331	-39	97	25.02	9	2	-11	69	134	-459
48	12.25	-17	16	1	-318	322	7	98	25.28	1	6	-5	37	162	-450
49	12.51	-20	20	0	-327	311	55	99	25.54	-1	7	-6	4	188	-440
50	12.77	-22	22	0	-329	295	98	100	25.80	-1	10	-8	-26	213	-413

ANEXO B: Segundo experimento.

Las mediciones del segundo experimento fueron tomadas de pruebas realizadas al motor en vacío, 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 de la corriente del estator.

Tabla 2: Datos Nominales del motor,

Potencia Nominal, (kW).	15
Tensión Nominal, (U).	440
Corriente nominal, (A).	21
Factor de Potencia Nominal, (PU).	0.93
Frecuencia Nominal, (Hz).	60
Velocidad Nominal del rotor, (rev/min).	1740
Conexión del devanado del estator, (Estrella, Delta).	Estrella
Números de pares de polos	2

Tabla2.1: Datos experimentales del motor.

#	Time	Ia	Ib	Ic	Va	Vb	Vc	#	Time	Ia	Ib	Ic	Va	Vb	Vc
-	(ms)	(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	-	(ms)	(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)
1	0.00	-8	-1	11	-67	-132	459	51	13.03	-22	23	0	-334	280	141
2	0.26	0	-4	5	-32	-162	452	52	13.29	-21	21	1	-336	260	181
3	0.52	1	-6	6	0	-190	441	53	13.55	-18	17	1	-334	237	223
4	0.78	1	-10	10	28	-215	426	54	13.81	-13	12	2	-325	213	262
5	1.04	1	-14	13	63	-239	403	55	14.07	-8	4	4	-313	186	294
6	1.30	1	-17	17	98	-262	378	56	14.33	-6	0	7	-301	153	324
7	1.56	1	-21	20	134	-281	352	57	14.59	-8	0	10	-283	125	353
8	1.82	1	-22	22	167	-297	325	58	14.85	-12	0	13	-262	93	380
9	2.08	0	-22	22	193	-311	288	59	15.11	-15	0	16	-243	60	403
10	2.35	0	-19	19	223	-327	251	60	15.37	-19	-1	20	-220	26	422
11	2.61	0	-14	13	248	-336	213	61	15.64	-21	-3	22	-192	-4	434
12	2.87	3	-8	4	267	-338	174	62	15.90	-22	-1	23	-164	-37	445
13	3.13	7	-6	-2	280	-339	130	63	16.16	-20	-1	21	-134	-72	459
14	3.39	10	-8	-1	301	-336	84	64	16.42	-16	-1	17	-100	-107	459
15	3.65	13	-12	-1	310	-329	37	65	16.68	-8	-2	11	-69	-137	456
16	3.91	17	-16	0	315	-322	-7	66	16.94	-1	-4	5	-35	-165	452
17	4.17	20	-20	0	327	-311	-56	67	17.20	0	-6	6	-2	-192	443
18	4.43	21	-21	0	336	-295	-98	68	17.46	1	-10	10	32	-213	427
19	4.69	22	-22	0	338	-281	-139	69	17.72	1	-13	13	56	-239	405
20	4.95	21	-20	0	338	-260	-181	70	17.98	1	-17	17	91	-260	382

21	5.21	18	-16	-3	336	-236	-223	71	18.24	1	-21	20	130	-280	353
22	5.47	13	-11	-2	334	-213	-262	72	18.50	0	-23	22	164	-295	320
23	5.73	7	-3	-4	317	-185	-295	73	18.76	-1	-22	22	193	-308	288
24	5.99	6	0	-6	301	-157	-325	74	19.02	0	-19	19	222	-322	251
25	6.25	10	1	-10	283	-125	-355	75	19.28	0	-14	14	246	-336	216
26	6.51	13	1	-13	264	-91	-376	76	19.54	3	-8	6	266	-341	176
27	6.78	16	1	-16	241	-56	-399	77	19.80	7	-6	-2	288	-341	134
28	7.04	19	1	-19	218	-25	-420	78	20.07	10	-8	-1	299	-338	86
29	7.30	21	2	-21	192	0	-436	79	20.33	13	-12	-1	310	-332	40
30	7.56	21	2	-22	164	37	-445	80	20.59	17	-15	-1	318	-324	-5
31	7.82	19	1	-21	127	74	-454	81	20.85	20	-19	0	327	-311	-60
32	8.08	15	1	-16	97	109	-459	82	21.11	24	-21	0	336	-297	-97
33	8.34	8	2	-10	67	139	-457	83	21.37	22	-22	0	338	-280	-135
34	8.60	0	5	-4	35	165	-452	84	21.63	21	-20	0	338	-266	-179
35	8.86	-1	6	-5	2	192	-438	85	21.89	17	-16	-1	334	-243	-222
36	9.12	-2	10	-8	-30	215	-420	86	22.15	12	-11	-1	325	-215	-257
37	9.38	-1	13	-12	-63	241	-401	87	22.41	7	-3	-4	310	-186	-292
38	9.64	-1	17	-15	-97	266	-378	88	22.67	6	1	-7	301	-158	-324
39	9.90	-1	20	-19	-130	280	-350	89	22.93	9	0	-10	287	-127	-353
40	10.16	-1	22	-21	-160	295	-320	90	23.19	12	1	-13	262	-91	-380
41	10.42	-1	21	-20	-190	311	-285	91	23.45	16	1	-16	241	-60	-406
42	10.68	-1	18	-17	-220	325	-251	92	23.71	19	1	-20	220	-28	-422

43	10.94	-1	13	-12	-248	334	-215	93	23.97	21	1	-22	195	-2	-436
44	11.21	-3	8	-4	-267	338	-172	94	24.23	21	1	-23	165	33	-447
45	11.47	-7	6	2	-283	341	-127	95	24.50	20	2	-20	135	72	-454
46	11.73	-10	8	2	-299	336	-84	96	24.76	16	2	-16	97	107	-459
47	11.99	-14	13	1	-310	331	-39	97	25.02	9	2	-11	69	134	-459
48	12.25	-17	16	1	-318	322	7	98	25.28	1	6	-5	37	162	-450
49	12.51	-20	20	0	-327	311	55	99	25.54	-1	7	-6	4	188	-440
50	12.77	-22	22	0	-329	295	98	100	25.80	-1	10	-8	-26	213	-413

ANEXO C: Tercer experimento

Las mediciones del tercer experimento fueron tomadas de pruebas realizadas al motor en vacío, en la planta 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 de la corriente del estator.

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

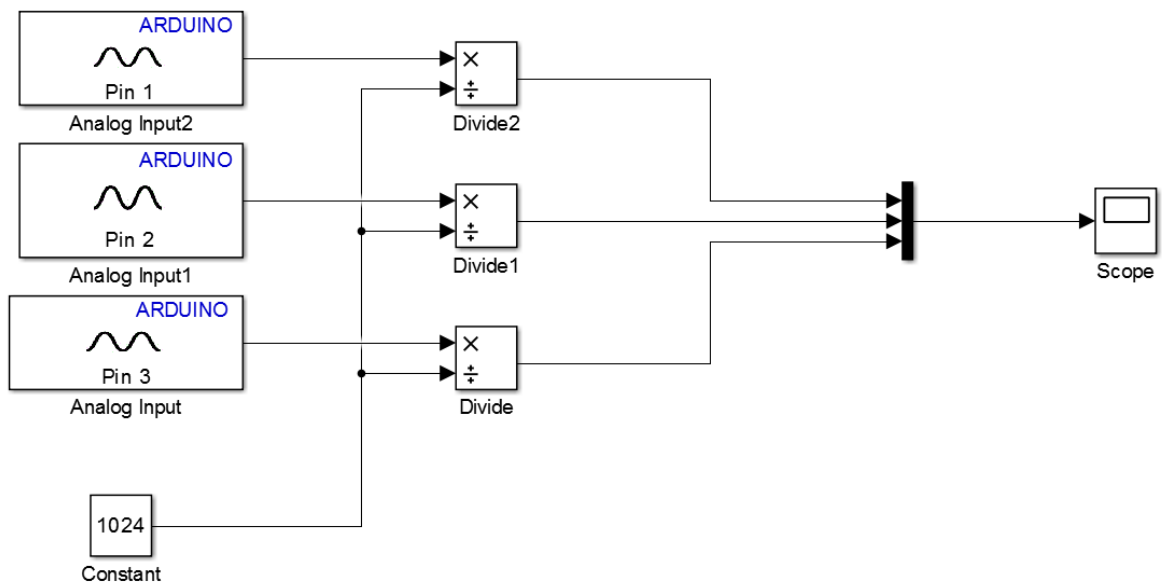
Tabla 3.1: Mediciones experimentales del motor de 2.23 kW, 1725 rpm.

#	Ia	Ib	Ic	Va	Vb	Vc	#	Ia	Ib	Ic	Va	Vb	Vc
-	(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	-	(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)
1	38 2	408	20	93	376	299	51	290	1,1	289	79,9	90,6	10,7
2	92	116	23	55	364	313	52	280	14,5	294	81,6	87	5,4
3	3	14	23	0	317	339	53	270	30,4	300	85	86,1	0,8
4	12	12	35	72	244	320	54	261	45,1	307	85	82,4	3,5
5	14	301	309	100	200	315	55	253	58,8	311	87,7	80,6	7,1
6	14	561	578	132	206	317	56	242	72,2	312	86,9	77,1	9,8
7	17	711	728	162	178	339	57	228	86,8	315	88,7	74,4	14,3
8	17	789	804	190	141	348	58	216	102	319	89,5	72,5	17
9	17	786	804	229	109	355	59	203	119	322	90,5	69,9	20,6
10	20	705	720	244	98	362	60	189	135	325	87,7	66,2	21,5
11	20	532	549	274	90	369	61	175	151	326	86,7	61,7	25
12	20	275	298	299	91	380	62	159	166	326	87,6	58	29,6
13	20	46	72	325	2	331	63	145	182	327	87,5	55,3	32,2
14	23	14	9	325	76	278	64	131	196	327	85,7	49,8	35,9

15	199	14	185	313	91	273	65	117	205	325	83,8	46,2	37,6
16	460	14	442	299	107	222	66	101	221	323	84,7	40,7	44
17	645	14	627	315	144	174	67	85,7	235	320	84,7	37,2	47,5
18	757	17	740	334	183	139	68	69,7	248	317	81,8	32,5	49,3
19	806	17	786	359	225	91	69	53,7	259	312	82	29	53
20	783	17	763	357	241	98	70	36,9	268	305	80,2	24,5	55,7
21	679	20	656	361	262	100	71	17,5	279	297	78,2	18,1	60,1
22	491	20	471	383	301	65	72	0,1	289	288	74,7	13,6	61,1
23	220	23	199	376	311	53	73	16,4	296	280	73,7	9,9	63,8
24	43	23	26	329	318	0	74	31,7	302	270	65,5	1,7	63,8
25	20	43	23	5	334	327	75	45,8	306	261	65,6	2,7	68,3
26	14	9	23	81	281	334	76	59,8	312	252	64,8	6,2	71
27	14	202	220	72	218	313	77	73,3	316	243	62,8	9,9	72,7
28	14	460	480	120	181	311	78	87,4	318	231	57,4	14,4	71,8
29	17	645	665	142	174	353	79	102	321	218	53,7	18,1	71,8
30	20	757	778	174	157	355	80	118	324	205	53,7	20,8	74,5
31	20	789	812	215	118	346	81	134	327	193	48,4	25,3	73,7
32	23	740	763	236	98	366	82	149	329	180	43,7	29	72,7
33	23	601	624	273	84	362	83	164	330	165	41	33,5	74,5
34	26	376	402	297	30	334	84	179	331	151	32,9	38,9	71,8
35	26	69	104	302	26	341	85	194	332	137	32,8	41,7	74,5
36	29	20	3	338	23	304	86	207	331	124	28,5	45,2	73,7

3 7	66	20	61	345	84	232	87	219	329	109	28,3	48,9	77,2
3 8	318	20	295	399	125	193	88	233	327	94,2	20,2	54,3	74,5
3 9	541	20	517	357	157	139	89	246	325	78,6	15,7	58	73,7
4 0	3,9	679	20	308	160	160	90	258	322	63,4	14,7	60,7	75,4
4 1	4,16	757	20	324	165	165	91	268	316	47,8	8,5	65,2	73,7
4 2	4,42	766	23	346	220	113	92	278	308	29,7	3,8	69,9	73,7
4 3	4,68	694	23	346	241	107	93	288	299	11,2	1,6	73,4	71,8
4 4	4,94	541	23	352	264	95	94	295	289	5,4	8	77,1	69,1
4 5	5,2	306	26	364	301	65	95	300	279	21,2	9,6	77,9	68,3
4 6	5,46	69	26	320	318	18	96	305	269	36,3	16	80,6	64,6
4 7	5,72	9	29	285	331	62	97	310	259	50,9	18,8	83,4	64,6
4 8	5,98	12	46	236	313	81	98	314	250	63,9	21,5	83,4	61,9
4 9	310	37,8	272,2	75,3	93,3	18	99	317	240	77,1	25,1	84,3	59,2
5 0	299	17,8	281,6	79	93,3	14,3	100	319	228	91,4	28,7	85,3	56,6

ANEXO D: Programa para adquisición de datos



Select:

- Solver
- Data Import/Export
- Optimization
- Diagnostics
- Hardware Implementation
- Model Referencing
- Simulation Target
- Code Generation
- Run on Target Hardware**

Target hardware selection

Target hardware: **Arduino Mega 2560**

Host-board connection

Set host COM port: **Manually**

COM port number: **3**

Overrun detection

Enable overrun detection

Signal monitoring and parameter tuning

External mode transport layer: **serial**

Arduino analog input channel properties

Analog input reference voltage: **Default**

Arduino serial port properties

Serial 0 baud rate: **9600**

Serial 1 baud rate: **9600**

ANEXO E: Programa en Matlab

```
% MUESTRAS CARGANDO LA ONDA
ecg=signal1;
t=tiempo2;
figure(1);
subplot(4,1,1);
plot(t,ecg);
xlabel('tiempo');
ylabel('magnitud')
title('señal de corriente')

%señal sin ruido para esto se resta la señal menos la media de la misma
%señal
ecg2=ecg-mean(ecg);
figure(1);
subplot(4,1,2);
plot(t,ecg2);
grid;
xlabel('tiempo(s)');
ylabel('Magnitud(mV)')
title('señal de coriirente sin armonicos')
%Análisis espectral con plot
fs=100
muestras=length(ecg2);
ordenadas=fft(ecg2,muestras);
ordenadas=abs(ordenadas);
abscisas=linspace(0,fs,muestras)
figure(1);
subplot(4,1,3);
plot(abscisas,(0.10*ordenadas));
grid;
xlabel('frecuencia(Hz)');
ylabel('db')
title('Análisis Espectral(dominio de la frecuencia)')
%Análisis espectral con stem
muestras=length(ecg2);
ordenadas=fft(ecg2,muestras);
```

```
ordenadas=abs(ordenadas);  
abscisas=linspace(0,fs,muestras)  
figure(1);  
subplot(4,1,4);  
stem(abscisas,(0.10*ordenadas));  
grid;  
xlabel('frecuencia(Hz)');  
ylabel('corriente');  
title('Análisis Espectral(dominio de la frecuencia)')
```