

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Automática y Sistemas Computacionales**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

### **Algoritmos de detección de fallos en motores eléctricos**

**Autor: Erik Hernández Rodríguez**

**Tutor: Dr.C. Boris L. Martínez Jiménez**

**Santa Clara**

**2015**

**"Año 57 de la Revolución"**

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Automática y Sistemas Computacionales**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

### **Algoritmos de detección de fallos en motores eléctricos**

**Autor: Erik Hernández Rodríguez**

email: ehrodriguez@uclv.edu.cu

**Tutor: Dr.C. Boris L. Martínez Jiménez**

Dpto. de Automática, Facultad de Ing.Eléctrica, UCLV

email: boris@uclv.edu.cu

**Santa Clara**

**2015**

**"Año 57 de la Revolución"**

## **PENSAMIENTO**

El conocimiento es como el fuego que inicia con una chispa solitaria en un bosque de hojarasca...solo necesita del aire para encenderse un poco más y después se propaga por sí solo.

## DEDICATORIA

Dedico esta tesis especialmente a mi mamá,  
*Por su apoyo y esfuerzo porque todo saliera bien.*

A mis abuelos que son muy importantes para mí,  
*Siempre indicándome el camino correcto a seguir.*

A mi tío y prima,  
*Que hacen todo posible por siempre ayudarme.*

A mi novia y su familia,  
*Por siempre darme su mejor consejo y atención.*

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar doy las gracias a mi familia por haber estado a mi lado en todo momento. Todos los logros obtenidos no habrían sido posibles de no ser por su apoyo incondicional y el ánimo que me entregaron. Agradezco especialmente a mi mamá, a mis abuelos, a mi tío y mi prima, a mi novia y su familia por ayudarme en todo lo posible. Su cariño y su confianza han sido factores fundamentales para seguir avanzando. Agradezco siempre el interés mostrado por conocer de todos los avances y logros alcanzados. La compañía, el cariño, la paciencia y el amor entregados me dieron la fuerza para seguir trabajando cuando estaba cansado y sus puntos de vista más humanistas me ayudaron a pensar en otras líneas de acción que resultaron mejores.

A mi tutor Doctor Boris Luis Martínez Jiménez por asesorarme a lo largo de la tesis, por su paciencia y por acompañarme en este camino que hoy culmina en el presente proyecto, por compartir su conocimiento conmigo e inspirar en mí una gran admiración.

A mis amigos de estos cinco años Omar, Andrés, Gustavo que juntos hemos convivido en todas las circunstancias posibles y siempre han mostrado una actitud incondicional conmigo.

A todos los que han hecho posible la realización de esta tesis.

Gracias.

## RESUMEN

La detección y diagnóstico de fallas en motores eléctricos de inducción es un tema de vital importancia para el correcto funcionamiento de la industria, otras entidades donde estén presentes los mismos y en proyectos de investigación de la universidad. En esta investigación se implementan técnicas en Matlab sobre la detección de fallas basadas en procesamiento de señales. Varias son los fallos presentes en estos motores y numerosos los métodos propuestos para su detección y diagnóstico. Se selecciona como objeto de estudio de esta tesis el análisis de una magnitud fundamental: la corriente, y se confecciona un programa computacional para analizar a través de técnicas matemáticas como la Transformada Rápida de Fourier y Análisis de Correlación la magnitud anteriormente mencionada. El programa implementado incluye también el análisis de otras variables. Se puede identificar a través del software implementado algunas de las fallas con los datos obtenidos además de conocer su naturaleza. La validez de la propuesta se constata mediante simulación, con lo cual se corrobora que el software permite detectar fallas en motores eléctricos de inducción.

## TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO .....	i
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
RESUMEN .....	iv
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1. PRINCIPALES FALLAS Y MÉTODOS DE DETECCIÓN EN MOTORES ELÉCTRICOS. ....	6
1.1 Principales fallas en motores eléctricos. ....	6
1.1.1 Causas de fallas en el estator. ....	6
1.1.2 Causas de fallas en el rotor. ....	10
1.1.3 Generalidades.....	12
1.2 Métodos empleados en la detección de fallas en motores eléctricos. ....	12
1.2.1 Sistema de diagnóstico de fallos en motores eléctricos utilizando el análisis espectral de la corriente del motor (MCSA). ....	12
1.2.2 Diagnóstico de Fallas en Máquinas Eléctricas Rotatorias utilizando la Técnica de Espectros de Frecuencia de Bandas Laterales.....	13
1.2.3 Diagnóstico de fallas estáticas en motores de inducción de jaula de ardilla por medio de la corriente de secuencia negativa. ....	15
1.2.4 Detección de fallas en máquinas de inducción basada en algoritmos de Serie de Transformada Rápida de Fourier (STFT) y Transformada Wavelet.....	16

1.2.5 Diagnóstico de fallas en motores de inducción utilizando Redes Neuronales Artificiales (RNA).	17
1.3 Consideraciones parciales.	18
<b>CAPÍTULO 2. MÉTODOS CLÁSICOS PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS.</b>	<b>19</b>
2.1 Análisis de la Corriente Estatórica.	19
2.1.1 Justificación Teórica de la Máquina eléctrica sin Fallo.	20
2.1.2 Justificación Teórica en Máquina con fallo.	21
2.1.3 Analisis espectral	23
2.2 Transformada Rápida de Fourier (FFT).	24
2.3 Frecuencias características de los fallos.	26
2.4 Análisis de correlación.	29
2.5 Valor eficaz de la tensión. RMS ( <i>Root Mean Square</i> ).	31
2.6 Software para detección de fallas de motores eléctricos.	32
2.5.1 Coeficiente de correlación.	33
2.7 Consideraciones parciales	33
<b>CAPÍTULO 3. PROGRAMA PARA EL ANÁLISIS Y DETECCIÓN DE FALLAS EN MOTORES ELÉCTRICOS</b>	<b>35</b>
3.1 Descripción del motor empleado.	35
3.2 Análisis del motor sin fallos según el software implementado.	36
3.2.1 Análisis de corriente.	38
3.2.2 Análisis de tensión.	39
3.2.3 Análisis de potencia.	40
3.2.4 Análisis de velocidad.	41
3.2.5 Analisis FFT de corriente.	42
3.2.6 Analisis FFT tensión.	43



3.2.7	Análisis FFT potencia.....	44
3.2.8	Análisis completo. ....	45
3.3	Prueba realizada al motor añadiéndole la componente fundamental de fallo.....	45
3.3.1	Presentación de ambas gráficas superpuestas para analizar sus diferencias...46	
3.4	Interfaz GUI implementada.....	47
3.5	Análisis económico. ....	48
3.6	Consideraciones parciales.....	49
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		50
Conclusiones.....		50
Recomendaciones .....		51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		52

## INTRODUCCIÓN

Los motores eléctricos juegan un papel muy importante en la industria moderna. Las fallas imprevistas pueden producir grandes pérdidas económicas. Estudios recientes indican que el 90% de los fallos en máquinas ocurren a raíz del funcionamiento anormal de los componentes internos (Castelli Lemez and Andrade, 2007). En esta línea, el mantenimiento correctivo (reactivo) del equipo es una práctica muy costosa, ya que implica paradas no programadas y los daños provocados por las fallas de los equipos. Las actuales exigencias de calidad consideran cada vez más necesaria la utilización de sistemas de monitoreo y detección de fallas, de modo de no interrumpir la producción.

Los motores eléctricos de inducción son los responsables, en muchos casos, del correcto funcionamiento del sistema productivo. Existen hoy muchas técnicas publicadas y herramientas avaladas comercialmente de detección de fallas en motores de inducción, que pueden garantizar un mayor grado de confiabilidad en su funcionamiento. Además, existen varios estudios que demuestran las fortalezas de dichos algoritmos para detectar fallas incipientes en motores de inducción y la factibilidad de implementación del mismo a nivel industrial. A pesar de esto, la mayoría de las industrias aún no utilizan técnicas de detección y monitoreo de máquinas eléctricas.

En el diseño de los sistemas de detección y diagnóstico de fallas aplicados a la industria, se requiere del conocimiento previo de los niveles de riesgo y criticidad de cada una de sus plantas y equipos, así como también de las características dinámicas de los procesos, número de señales de entrada y salida por cada variable crítica, con el fin de determinar que método o técnica es más apropiada aplicar. La detección y diagnóstico de fallas exige el empleo de sensores adecuados (Costa, 2006). Enorme variedad de sensores pueden ser empleados para recolectar datos de parámetros de funcionamiento en motores eléctricos con el propósito de

detectar y monitorear fallas. Las fallas más comunes en estos dispositivos se pueden clasificar en fallas mecánicas y de aislamiento. Existen algoritmos para la detección y diagnóstico de fallos como son los clásicos, las técnicas modernas (PCA y Wavelet) y métodos basados en Inteligencia Artificial.

En este caso particular, las posibles aplicaciones pueden ser el diagnóstico de fallas en motores industriales y convencionales, la utilización como herramienta fundamental en el mantenimiento preventivo de máquinas eléctricas y el empleo en proyectos del departamento.

Como muestra de lo anteriormente expresado, se realizan en la facultad investigaciones volcadas a la obtención de sistemas computacionales para la industria (Proyecto Factoría de Software Industrial y para la Ingeniería) y al estudio de Sistemas de control tolerante a fallos basados en modelos para vehículos autónomos sumergibles los cuales utilizan motores eléctricos para su propulsión. De ahí su relación con el tema de estudio de esta tesis y los objetivos de la carrera. Como principal salida del segundo proyecto, se parte del interés del Centro de Investigación y Desarrollo Naval (CIDNAV) de tener un vehículo que les permita acometer misiones submarinas en el país. Siendo el mayor requisito el lograr que el vehículo logre acometer satisfactoriamente y sin fallos las misiones de exploración submarinas.

El tema de la tolerancia a fallos en vehículos subacuáticos es un aspecto crítico ya que estos vehículos son susceptibles a fallas de diversos tipos durante una misión submarina y en estas condiciones carecen de operación humana que permita la toma de decisiones eficaces. Otro aspecto a valorar es que la pérdida de un vehículo durante su misión pudiera provocar gran daño ecológico y grandes pérdidas económicas. Por todas estas razones no cabe duda de que es importante que los vehículos autónomos subacuáticos tengan un sistema capaz de detectar e identificar las fallas cuando ocurran y reaccionar ante ellas rápidamente. El desarrollo de este sistema de tolerancia a fallos para un vehículo autónomo sumergible de producción nacional constituye en sí un aspecto novedoso.

Un sistema tolerante a fallos empleando redundancia analítica es común dividirlo en tres subsistemas: subsistema de detección, subsistema de identificación de fallos y subsistema de acomodamiento a fallas. Si las fallas son detectadas e identificadas tempranamente, pueden tomarse las acciones apropiadas para evitar una falla mayor previniendo la caída total del

sistema. La detección e identificación de fallas incipientes ayuda a los operadores a mantener o incluso incrementar la calidad de los productos manufacturados.

Las claves para una operación exitosa del motor son la calidad, la comprensión de la aplicación, la elección del tipo de motor apropiado para esa aplicación y el mantenimiento del mismo. Sin embargo, el uso de motores en la industria actual es intenso y los motores pueden ser expuestos a ambientes hostiles, errores de operación, defectos de manufactura, etc. (Rosero García, 2011). Diferentes fallas internas junto con fallas externas pueden ocurrir tarde o temprano, además, la amplia variedad de ambientes y condiciones a los cuales los motores son expuestos pueden envejecerlos y hacerlos sujetos de una falla prematura. Estos tipos de fallas se refieren al deterioro gradual del motor el cual puede terminar con una falla mayor si no es detectada a tiempo. Los problemas en los motores pueden causar crisis que son costosas para las empresas, y por lo tanto, se desean evitar.

El diagnóstico temprano de fallas permitiría el mantenimiento adecuado y evitaría periodos de inactividad debido a fallas mayores lo cual mejoraría globalmente la disponibilidad y el desempeño además de que los gastos de mantenimiento son reducidos. Por ejemplo, sólo en Estados Unidos los motores convierten el 60% de la energía y según este estudio, las fallas más comunes en motores de inducción están relacionadas con el rotor, mientras que otros estudios indican que 3/4 partes de las fallas en motores se relacionan con bobinados y soportes, algunos más, afirman que problemas de desbalance y desalineamiento son causa de vibraciones excesivas en un 40% a 50% de los casos, mientras que, aproximadamente entre el 30-40% de las fallas son producidas en el estator (Castelli Lemez and Andrade, 2007) .

A partir de estos antecedentes, se puede plantear que el **problema científico** consiste en la carencia de conocimiento por parte del departamento acerca de la detección y diagnóstico de fallas en motores eléctricos, dada la importancia que se le concede por su amplia aplicación en la industria moderna y en proyectos del departamento como Teledirección y Factoría de Software Industrial y para la Ingeniería.

Por tanto, el **objetivo general** del trabajo es: Implementar en Matlab técnicas de detección de fallas en motores de inducción, específicamente, las basadas en procesamiento de señales.

### **Objetivos específicos**

- Analizar las principales técnicas empleadas en la detección de fallas de motores industriales, tanto convencionales como avanzados.
- Seleccionar las técnicas que se emplearán dentro del estudio.
- Programar en Matlab los algoritmos para la detección de las fallas seleccionados.
- Simular algoritmos y comparar los resultados.

### **Metodología de Trabajo**

Para el desarrollo de la investigación se utilizarán diferentes métodos y técnicas que en unidad y diferencias particulares nos permitirán el abordaje del problema. Estos métodos y técnicas favorecerán el cumplimiento de las siguientes tareas:

- Revisión de la bibliográfica técnico-especializada para la construcción del marco teórico de referencia general de la pesquisa.
- Selección de las herramientas para detección de fallas más efectivas dadas las exigencias del sistema.
- Delimitación y caracterización de las metodologías para la implementación de algoritmos.
- Análisis de los resultados obtenidos.
- Elaboración del informe del trabajo de diploma.

### **Estructura de la Tesis:**

En la Introducción quedará definida la importancia, actualidad y necesidad del tema que se aborda y se dejarán explícitos los elementos del diseño teórico de la investigación.

En el capitulario, la investigación incluirá tres capítulos, además de las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos correspondientes. Los temas que se abordarán en cada capítulo se encuentran estructurados de la forma siguiente:

Capítulo I: Se realizará un análisis de la literatura especializada sobre técnicas empleadas en la detección de fallas y se hará una selección de las técnicas más adecuadas para la detección de fallas en motores eléctricos.

Capítulo II: Se realizará una identificación de los parámetros necesarios para la detección de las fallas y se implementarán algunos algoritmos seleccionados. En este capítulo también se hará el análisis teórico de los algoritmos implementados

Capítulo III: Se presenta la simulación de algoritmos y modelos, además de la comparación de los resultados y por último se realizará una evaluación crítica de los diferentes algoritmos.

## **CAPÍTULO 1. PRINCIPALES FALLAS Y MÉTODOS DE DETECCIÓN EN MOTORES ELÉCTRICOS.**

El objetivo de este capítulo es realizar una minuciosa revisión y recopilación de los principales fallos que pueden poseer las máquinas eléctricas, así como de las diferentes técnicas o métodos empleados para la detección y diagnóstico de dichos fallos. Se profundiza principalmente en los fallos referidos a los componentes eléctricos y, por tanto, se hace hincapié en las técnicas de diagnóstico y detección referidas a este tipo de fallos y sobre todo las orientadas a las máquinas eléctricas rotativas de inducción.

### **1.1 Principales fallas en motores eléctricos.**

En este apartado son abordadas las principales fallas incipientes que ocurren en motores asíncronos de inducción. La mayoría de las fallas en motores eléctricos pueden ser clasificadas en dos grupos: fallas de aislamiento y fallas mecánicas (Botha, 1997). Las fallas de aislamiento son caracterizadas por dañar las espiras del estator, conocidas como cortocircuito en el enrollamiento del estator. Las fallas mecánicas, en su mayoría están asociadas a daños en el rotor o componentes relacionados al mismo. Dentro de las principales fallas mecánicas se pueden destacar las siguientes: daños en rodamientos, quiebre de barras y anillos del rotor, irregularidades en el entrehierro (excentricidades estáticas y dinámicas) y desbalances (Castelli Lemez and Andrade, 2007).

#### **1.1.1 Causas de fallas en el estator.**

En general los usuarios y fabricantes de motores tienen buen conocimiento de los daños que pueden ocurrir debido al sobrecalentamiento de los sistemas de aislamiento. El bloqueo del

ventilador en un motor puede causar sobrecalentamiento, así como también las sobrecargas a las que se vea afectado el motor (Bonett and Soukup, 1992). Este último punto es el motivo causante de buena parte de los daños de la parte eléctrica en motores de inducción. Para controlar este problema, en máquinas de medio y gran porte, pueden ser instalados sensores de temperatura en posiciones estratégicas del estator, y así poder monitorear temperatura, y de esta forma poder evitar el sobrecalentamiento.

La quiebra de barras y ralladura de los anillos del rotor también son responsables por el sobrecalentamiento de la máquina, con una consecuente reducción de par y aumento del nivel de vibraciones. Este problema puede ser detectado de varias formas, como análisis de vibración, análisis de corriente, o por simple inspección visual si el rotor es separado del estator (Castelli Lemez and Andrade, 2007).

Los procedimientos normalizados, revelan que cada 10°C que exceda la temperatura límite del aislamiento, la vida útil del mismo es reducida a la mitad.

A menos que la temperatura de operación del motor sea extremadamente elevada como para ocasionar un daño inmediato, los efectos normales del envejecimiento térmico confieren al sistema vulnerabilidad a otras sollicitaciones que puedan ocurrir, produciendo esta alguna falla.

### **Causas de sobrecarga térmica.**

Las variaciones de tensión afectan el funcionamiento del motor y la temperatura de los bobinados. A la hora de diseñar motores, se suele utilizar un criterio que permita la operación satisfactoria del mismo con  $\pm 10\%$  de variaciones de tensión.

Un pequeño desbalance de fase causará un aumento de temperatura en los bobinados del estator. Se ha constatado que cada 3.5% de desbalance por fase, la temperatura del bobinado aumenta un 25% en la fase de mayor corriente. Por ello se deben mantener las tres fases lo mejor balanceadas posibles, con el fin de evitar la ocurrencia de este problema.

Si el motor es sometido a sucesivos arranques en un corto período de tiempo, la temperatura de los bobinados aumentará rápidamente debido a las altas corrientes de arranque. Otra consecuencia de los arranques cíclicos es la contracción y expansión del aislante de las bobinas, tornándolo frágil y susceptible a quebraduras con el pasar del tiempo.



Muchos motores de inducción son fabricados con una cierta holgura en la carga máxima de operación en régimen continuo, caracterizado como factor de servicio (no debe ser confundido con la sobrecarga momentánea del motor, la cual vale para cortos períodos de tiempo). La utilización del factor de servicio implica una vida útil del motor menor a aquella en que el motor se encuentre operando con carga nominal (Castelli Lemez and Andrade, 2007).

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

### **Fallas eléctricas.**

El dieléctrico es un aspecto importante a la hora de analizar las fallas eléctricas. Existe una relación entre la vida del aislante del bobinado y la sobretensión aplicada. Cada material aislante posee sus particularidades, teniendo algunos mayor capacidad de tolerancia a la tensión que otros. Esta sobretensión puede causar cortocircuitos en el bobinado de tres formas:

- Fase-fase
- Espira-espira
- Espira-tierra

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

Las condiciones de sobretensión ocurren con cierta frecuencia y de corta duración durante la utilización de motores eléctricos, dando como resultado la reducción de la vida útil del bobinado y pudiendo ocasionar fallas prematuras.

Las oscilaciones de corriente y sobretensión normalmente dañan la aislación de las espiras del estator pudiendo esto ocasionar cortocircuitos entre espiras. Estos problemas ocurren debido a la apertura y cierre de contactos. Las sobretensiones pueden ser producto de las siguientes condiciones:

- Falta de aterramiento
- Abertura y cierre de disyuntores
- Conexión de banco de capacitores
- Colocación de fusibles limitadores de corriente.

#### **Fallas Mecánicas.**

El paso de corriente por los bobinados del estator produce esfuerzos directamente proporcionales al cuadrado de la corriente. Estos esfuerzos alcanzan su máximo valor en el arranque del motor, ocasionando vibraciones en las espiras de los bobinados. Esta vibración provoca un movimiento relativo entre las espiras, el cual se acentúa más en las cabezas de bobinas, pudiendo ocasionar cortocircuitos (Castelli Lemez and Andrade, 2007).

Cualquier vibración excesiva también puede provocar daños en los rodamientos del motor. Para disminuir este problema es aconsejable mantener siempre alineada la máquina de modo de reducir las vibraciones excesivas.

Las razones más comunes que conducen al contacto entre el rotor y el estator son las siguientes:

- Fallas en los rodamientos.
- Deflexión del eje.
- Desalineamiento entre rotor y estator.

#### **Fallas relacionadas al medio exterior.**

La presencia de materiales extraños puede llegar a provocar daños en el estator, como por ejemplo reducción de la disipación de calor, con la consecuente reducción de la vida útil del

aislante de los bobinados, fallas prematuras en el sistema de aislamiento debido a esfuerzos localizados y averías en el aislamiento causando cortocircuitos. Otro factor muy importante, a la hora de considerar fallas de aislamiento relacionadas al entorno en donde se encuentra operando el motor, es la humedad del medio, ya que el ingreso de humedad en el aislante puede ser un factor desencadenante de cortocircuitos en los bobinados (Castelli Lemez and Andrade, 2007).

### **1.1.2 Causas de fallas en el rotor.**

Un aspecto a tratar en este subepígrafe, al igual que en el anterior, son las fallas por problemas térmicos. La sobrecarga y el desbalance térmico son sus principales afectaciones.

Puede ocurrir durante la partida, régimen permanente o en condiciones de rotor bloqueado, siendo esta última la condición responsable por lo mayores daños en el rotor. Las causas más comunes de falla por sobrecarga térmica son enumeradas a continuación:

- Gran número de arranques consecutivos ocasionando altas temperaturas en las barras y los anillos del rotor.
- Rotor bloqueado debido a grandes cargas impuestas en el eje del motor.
- Fricción entre estator y rotor debido a fallas en el sistema de rodamientos o condiciones de altas vibraciones.
- Rotura de barras del rotor debido a la fatiga
- Ventilación insuficiente.

El sobrecalentamiento es un problema bastante común en motores de inducción, con la ventaja de que puede ser fácilmente detectado y corregido. Medidas simples de mantenimiento pueden contribuir de forma significativa a solucionar este problema.

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

- Arranques frecuentes del motor, pudiendo esto ocasionar diferentes temperaturas en las barras del rotor.
- Transferencia de calor desigual entre el centro y las barras del rotor

- Gradientes de temperatura debido a la circulación de corriente desigual generada por rotura de barras.

Así como es relativamente sencilla la identificación de problemas de vibración en máquinas eléctricas, también lo es la identificación de desbalances térmicos, no así la identificación de la causa del problema (Castelli Lemez and Andrade, 2007).

### **Fallas dinámicas.**

La mayoría de las solicitaciones dinámicas ocurren por procedimientos de operación del motor que obligan al mismo a sobrepasar sus límites operativos de diseño, como por ejemplo, torques excesivos en el eje o sobre-velocidades.

### **Fallas magnéticas.**

Las fuerzas electromagnéticas son proporcionales al cuadrado de la corriente, siendo unidireccionales y tienden a dislocar las barras produciendo una deflexión en las mismas. El mayor esfuerzo sobre las barras ocurre durante el arranque del motor, debido a las altas corrientes generadas.

Idealmente el rotor se encuentra centrado y las fuerzas electromagnéticas balanceadas en direcciones opuestas, sin causar deflexión en el rotor. En la práctica, el rotor no se encuentra perfectamente centrado, ya que factores como el peso propio del rotor, desgaste en los rodamientos y alineación del motor influyen en el centrado del mismo.

El desbalance electromagnético es un problema que puede llevar a la flexión del rotor, pudiendo provocar que entren en contacto el rotor con el núcleo del motor o incluso con los mismos bobinados.

### **Fallas relacionadas al medio externo.**

De la misma forma que para el estator, materiales que penetren dentro del motor pueden provocar abrasión, corrosión o impedir el correcto funcionamiento del sistema de ventilación provocando de esta forma sobrecalentamientos (Castelli Lemez and Andrade, 2007).

### **Fallas mecánicas.**

Algunas de las causas más comunes de fallas mecánicas en el rotor son el desprendimiento de capas o el incorrecto ajuste del eje del rotor.

### 1.1.3 Generalidades

En general los fallos en máquinas eléctricas se encuentran dominados por fallos en los rodamientos y en las bobinas del estator. Enfocados en motores de inducción, la estadística de fallos es la siguiente (Thomson and Fenger, 2003):

- Fallos relacionados a rotura en los rodamientos: 41%
- Fallos relacionados a problemas en el estator: 37%
- Fallos relacionados a problemas en el rotor: 10%
- Otros fallos: 12%

## 1.2 Métodos empleados en la detección de fallas en motores eléctricos.

En la actualidad se utilizan técnicas y metodologías tanto clásicas como avanzadas, algunas sumamente complejas. La presencia de estas técnicas, se justifican debido a que son necesarias en los procesos y metodologías para que sean capaces de reaccionar ante posibles casos de fallas, de manera precisa y oportuna en sistemas o procesos físicos en tiempo real. En este epígrafe se analizarán algunas de estas técnicas.

### 1.2.1 Sistema de diagnóstico de fallos en motores eléctricos utilizando el análisis espectral de la corriente del motor (MCSA).

El método MCSA (*Motor Circuit Spectrum Analysis*) (Nandi and Toliyat, 1999) es el más utilizado hoy en día y se basa en el análisis espectral de las corrientes de estator del motor eléctrico que requiere de al menos un sensor de corriente por máquina. Se utiliza para el diagnóstico de fallos mecánicos en motores, tales como las barras rotas, excentricidad, espiras cortocircuitadas, daños en cojinetes; y también de fallos eléctricos, tales como fase abierta y conexiones anormales. Sin embargo, si bien la técnica MCSA funciona adecuadamente para un régimen de alimentación de frecuencia fija, no se puede utilizar en condiciones no estacionarias de los motores eléctricos.

Además, para realizar el método para diagnóstico de fallos conocido como MCSA, es necesaria la medida de la corriente que circula por el estator del motor. Para ello existen diferentes alternativas. Entre los métodos que destacan están los siguientes:

- Resistencia *shunt*

- Sensores de efecto Hall
- Transformadores de corriente

Otra alternativa como sensor de medida de corriente, tanto para MCSA como para otros métodos de diagnóstico de fallos en motores eléctricos, es el uso de bobinas Rogowski, que consiste en un toroide con núcleo de aire o de material no magnético. La simplicidad del diseño y la ausencia de núcleo magnético hacen que el costo de la bobina Rogowski sea inferior al de los otros tipos de sensores para la medida de corriente.

Para obtener una señal proporcional a la corriente que circula por el motor se utilizan circuitos integradores. La tensión final de salida de la sonda, depende del núcleo y de la ganancia del circuito integrador.

Sin embargo, los circuitos integradores presentan problemas de saturación debido a la no idealidad de los componentes y debido al tipo de corrientes con sobrepicos asimétricos que circulan por los motores.

Generalmente los motores son alimentados mediante circuitos inversores de potencia, estos generan pulsos de tensión superpuestos al armónico fundamental con una cierta asimetría, es decir, la parte positiva de la onda puede tener área diferente de la negativa (Bouzzid and Champenois, 2012). Esto provoca que el condensador de retroalimentación del circuito integrador se cargue hasta que el circuito se satura, especialmente en las medidas de baja frecuencia donde es difícil filtrar esta componente previamente al proceso de integración.

### **1.2.2 Diagnóstico de Fallas en Máquinas Eléctricas Rotatorias utilizando la Técnica de Espectros de Frecuencia de Bandas Laterales.**

En las máquinas rotatorias, se generan voltajes en los devanados o grupos de bobinas al girar estos de manera mecánica a través de un campo magnético. También, al girar mecánicamente un campo magnético por el devanado o al diseñar un circuito magnético de manera que la reluctancia varíe con la rotación del rotor. En general cualquier máquina rotatoria consta de un estator y un rotor separados por un entrehierro, el cual es de vital importancia en las interacciones magnéticas entre estas partes que dan lugar a los voltajes antes mencionados.

Sin embargo, aún en máquinas rotatorias nuevas existen pequeñas desviaciones entre la posición que debe guardar el rotor con respecto al estator, lo que origina que se modifique el

entrehierro de la máquina y por ende afecte los voltajes inducidos. Debido al desgaste natural de baleros, soportes, al tipo de carga o al acoplamiento mecánico de la máquina se incrementa el desajuste entre el rotor y el estator. Este fenómeno que puede implicar excentricidad, desalineación, entre otros problemas repercute en el desempeño de la máquina (Padilla, 2006).

Con el fin de garantizar que la máquina eléctrica rotatoria como tal esté operando en forma continua, es necesario contar con técnicas de medición que además de permitir detectar la falla no impliquen el sacarla de operación. Una técnica de medición en línea adecuada para este fin es el análisis espectral de corriente medida a través de la transformada rápida de Fourier (FFT) (Fernández et al., 1998) contenida en los equipos de medición que tienen esta función.

Esta técnica de las bandas laterales en el diagnóstico de fallas en máquinas rotatorias tiene varias décadas, pero toma fuerza en los 80's hasta inicios de los 90's y toma forma final en los últimos quince años. En la actualidad, está bien reconocida en el ámbito internacional y solo se han presentados cambios significativos en los sensores de corriente y tensión así como en los equipos de registro, ya que han sido utilizados osciloscopios, analizadores de espectros y finalmente la computadora digital con tarjetas de adquisición de datos A/D y programas de cómputo comerciales o elaborados por los investigadores.

Como antecedentes de esta técnica en forma general se puede mencionar que en los años ochenta se presentó una análisis en estado permanente de motores trifásicos jaula de ardilla con fallas en el rotor, en anillos y barras (Williamson and Smith, 1982), además, se empleó el monitoreo de vibraciones y corrientes para la detección de excentricidad en el entrehierro en motores de inducción de gran capacidad. En los años noventa se presentó un método de monitoreo de la corriente en línea para el diagnóstico de excentricidad en el entrehierro (Thomson and Fenger, 2003), también se presentan resultados de diagnóstico en línea y fuera de línea de motores de inducción de baja, mediana y alta tensión (Carvajal et al., 1999).

En el año 2000 (Fernández et al., 1998) presentan una serie de técnicas de mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotatorias. Dentro de los trabajos reportados de una década hasta la actualidad, se tienen la aplicación de metodologías de diagnóstico de fallas en un motor de alta capacidad utilizado para una bomba de alta presión (Bossio et al., 2005),

posteriormente se presenta una metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallas en motores asíncronos de inducción (Castelli Lemez and Andrade, 2007), y la aplicación de redes neuronales artificiales en el diagnóstico de fallas en motores de inducción (Villada, 2007). Recientemente se han desarrollado nuevos libros dedicados al monitoreo de máquinas eléctricas rotatorias (Tavner et al., 2008), se han aplicado wavelets como una forma alternativa de detección de fallas, y se han presentado metodologías para la detección de fallas en rodamientos y engranajes (San Martín et al., 2010).

### **1.2.3 Diagnóstico de fallas estáticas en motores de inducción de jaula de ardilla por medio de la corriente de secuencia negativa.**

Los métodos de detección de fallas en el estator se basan en los signos expuestos por dicha condición, algunos de los cuales se evidencian mediante inspección visual directa (chispas, descargas parciales, deterioro del aislamiento, descamado, contaminación). Los métodos de inspección visual carecen de confiabilidad en la detección en estado incipiente y no permiten detectar un cortocircuito entre espiras de una misma bobina. Para cuando los síntomas se hacen notables, es porque normalmente la falla ha evolucionado de forma rápida y pone en peligro la vida del motor y toda la producción asociada (Bouزيد and Champenois, 2012). En reemplazo de la inspección directa, se han desarrollado métodos como inspección eléctrica de los aislamientos a través de la prueba de resistencia de aislamiento, la medida del índice de polarización, la medida de descargas parciales o la prueba de alto voltaje; pero según recomienda el estándar IEEE43-2000, la aplicación periódica de estas pruebas no es recomendable, porque los altos esfuerzos electromagnéticos a los que se somete el material aislante pueden deteriorarlo gravemente. Existen alternativas de diagnóstico en línea para fallas ubicadas en el estator de la máquina de inducción centradas en las corrientes de alimentación, entre las que se encuentran el análisis en el dominio de la frecuencia en el espectro de Fourier, tanto real como complejo, y las transformadas wavelet; pero estas requieren un esfuerzo computacional importante para el cual no siempre existen recursos disponibles (Nandi et al., 2005).

Cuando ocurren fallas en el devanado del estator, casi siempre se encuentran acompañadas por un desbalance en las corrientes de alimentación, el cual se manifiesta a través de la corriente de secuencia negativa; las modificaciones en magnitud y fase de esta corriente se



usan ampliamente como base para el diagnóstico, pero a lo largo de los años se ha demostrado que esta corriente no es un indicador totalmente fiable, ya que existen muchas fuentes de variabilidad, como los desbalances de voltaje y las asimetrías constructivas de la máquina (Bouزيد and Champenois, 2012); (Bakhri et al., 2010).

Dentro de las fallas ocurridas en el estator de un motor de inducción, ocupa un papel preponderante la falla por cortocircuito entre espiras, ya que el aislamiento entre dos espiras de una misma bobina suele ser débil y, bajo ciertas condiciones de operación, puede estar sometido a grandes esfuerzos electromagnéticos; esto lo convierte en el eslabón más débil del sistema total de aislamiento de un motor.

Las consecuencias de un cortocircuito entre espiras pueden ser catastróficas, porque aparece una corriente circulante localizada de un valor significativamente alto (varias veces la corriente nominal), que no se refleja en los terminales del motor que produce un efecto de aumento local de la temperatura. El incremento de temperatura hace que el aislamiento exterior se deteriore progresivamente, lo que lleva en poco tiempo a un cortocircuito de mayor envergadura, como el que ocurre entre fase y tierra o entre bobinas de diferentes fases dentro de la misma ranura (Bouزيد and Champenois, 2012). El signo exterior de la falla es que el motor se quema, pero el factor determinante de la falla catastrófica es la pérdida de aislamiento entre espiras. La técnica aplicada fue propuesta originalmente por (Bakhri et al., 2010) y validada por (Bouزيد and Champenois, 2012). El principal aporte se encuentra en la depuración del modelo y su aplicación para demostrar su operatividad con bajos costos computacionales.

#### **1.2.4 Detección de fallas en máquinas de inducción basada en algoritmos de Serie de Transformada Rápida de Fourier (STFT) y Transformada Wavelet.**

Para la variación de carga en el tiempo se realizó el análisis de frecuencia-tiempo, basado en Fourier (STFT), y un análisis de transformada wavelet tipo Meyer para determinar cambios y parámetros que permitan identificar fallas (Nandi and Toliyat, 1999). El análisis wavelet es capaz de relevar aspectos como tendencias, puntos de avería, discontinuidad.

La transformación wavelet consiste en la descomposición de la señal en un conjunto de niveles, cada uno de los cuales debe tener una aproximación de la señal y una señal de desviación llamada detalle. Dentro de las familias wavelet se escoge la transformada wavelet

Meyer. La wavelet Meyer y la función escalar están definidas en el dominio de la frecuencia (Ayhan et al., 2003).

Mediante el análisis de transformada de Fourier se puede centrar la atención en los armónicos de alta frecuencia y determinar la falla de cortocircuito, aunque se dificulta su análisis para señales cambiantes en el tiempo y se hace necesario recurrir a análisis en el tiempo-frecuencia como wavelet.

Las transformadas wavelet para torques variables permiten calcular un parámetro de decisión como la energía o valor rms que evidencia el tipo de falla de la máquina de forma segura. La transformada wavelet obtiene buenos resultados para la separación de frecuencias de las señales no estacionarias y aplica para detección de fallos incipientes. La transformada wavelet, por tanto, presenta mayor capacidad de síntesis e identificación de fallas de cortocircuito en motores de inducción que la técnica MCSA (Análisis espectral de señales corriente-estator por sus siglas en inglés) que, por enfocarse en el análisis espectral de la corriente de estator, requiere transformada de Fourier.

### **1.2.5 Diagnóstico de fallas en motores de inducción utilizando Redes Neuronales Artificiales (RNA).**

(Stefano et al., 1994) desarrolló una red neuronal para diagnosticar fallas entre espiras. Los datos de entrenamiento fueron obtenidos mediante un modelo basado en la teoría de vectores espaciales. El indicador de falla utilizado fue el porcentaje de espiras falladas. Después de entrenar y validar la red, el error fue inferior a 2.4%. Aunque el método es bueno, el inconveniente radica en las características del modelo por ser muy complejo en implementar.

(Filippetti et al., 1996) presentó una arquitectura de red neuronal para detectar cortocircuitos en el devanado del estator. El indicador de falla es el porcentaje de espiras falladas. La estructura de la red fue el perceptrón multicapa con nueve neuronas en la capa oculta. Filippetti aunque propone la red, no presenta los resultados de la aplicación de la misma.

(Tallam et al., 2003) propuso una RNA utilizando las componentes de secuencia de tensión y corriente para la detección de fallas entre espiras en un motor de inducción. La RNA estima la corriente de secuencia negativa, la cual es utilizada como indicador de falla. El inconveniente del método se tiene en la etapa de entrenamiento donde se requiere un volumen alto de datos experimentales, actividad que se dificulta en la práctica para cada uno de los

motores en los que se implemente el sistema. En el siguiente trabajo de (Tallam et al., 2003), se presenta un avance en el método anterior eliminando la etapa de aprendizaje y realizando el entrenamiento en línea. Sin embargo, cuando la falla evoluciona lentamente su detección se hace imposible.

### **1.3 Consideraciones parciales.**

Este capítulo se realiza una recopilación de las principales técnicas de diagnosis y detección de fallos más utilizadas en las máquinas eléctricas. Luego de realizar un análisis crítico de la literatura consultada, se arriban a las siguientes consideraciones.

Las principales fallas en motores eléctricos de inducción están divididas en tres grupos fundamentales: fallas mecánicas, eléctricas y de circuitos de potencia. Una de las fallas primordiales en un motor se debe a que se le coloca una carga excesiva, como consecuencia de esto los rodamientos comenzarán a fallar y el motor demandará más corriente, lo que incrementará su temperatura y reducirá su vida útil.

Básicamente, los métodos de diagnóstico se pueden dividir en tres puntos de enfoque: basado en procesamiento de señales, modelos y conocimiento. Sin embargo, la comprensión de modelos teóricos es complejo y difícil de obtener, y en algunas situaciones ciertamente se hace imposible. De ahí que se tome como punto de partida el enfoque basado en procesamiento de señales y otros métodos clásicos para la detección de fallas en estator, rotor y producto de la carga.

## **CAPÍTULO 2. MÉTODOS CLÁSICOS PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS.**

En el capítulo anterior se ha realizado una clasificación de los principales fallos que se producen en las máquinas eléctricas rotativas y de los métodos para detectarlos. También se mencionan que las corrientes, los voltajes, las velocidades y las potencias constituyen el grupo de las magnitudes principales presentes en las máquinas eléctricas a través de las cuales se podría realizar un análisis del estado de la máquina o inclusive ser usada por algún método para la detección y la diagnosis de fallos.

Por último, cabría decir que además de la magnitud seleccionada para el análisis, hay que tener en cuenta el régimen de funcionamiento de la máquina cuando se realiza la medida de la magnitud. Principalmente existen dos posibilidades, que son monitorizar en régimen transitorio (arranques y frenadas de la misma, etc.) o en régimen estacionario o permanente (cuando se estabiliza la salida y esta permanece casi invariable en el tiempo).

Tradicionalmente en el ámbito industrial, se han desarrollado métodos basados en el análisis del régimen permanente, que son los utilizados en este trabajo. En este capítulo se hace una introducción teórica de los métodos empleados así como se aborda la implementación de estos en Matlab.

### **2.1 Análisis de la Corriente Estatórica.**

Varias son las magnitudes utilizadas en realizar un análisis del estado de la máquina o usadas por algún método para la detección y la diagnosis de fallos. Sin pérdida de generalidad, en este apartado se tratará el análisis de la corriente estatórica, aunque el algoritmo tratado será aplicado a otras magnitudes.

La intensidad que circula por los devanados del estator es una de las magnitudes que más información nos aporta sobre el estado de la máquina, además es una de las magnitudes más

fáciles de medir mediante cualquiera de los transductores, tal y como se ha comentado en el capítulo anterior (Puche, 2008).

### 2.1.1 Justificación Teórica de la Máquina eléctrica sin Fallo.

Una vez adquirida la corriente de una fase del estator, si se representa en función del tiempo se observa que la forma de onda representada responde a un tipo concreto de onda denominado sinusoidal. Debiéndose principalmente a que las máquinas eléctricas están alimentadas de un sistema trifásico de tensiones sinusoidales. En la Figura 2.1, se representa la corriente estatórica de una máquina eléctrica sin fallo en vacío, frente al tiempo. La corriente que circula por los devanados del estator de la máquina eléctrica rotativa responde a las siguientes ecuaciones, según por la fase que circule.

$$i_{A,0}(t) = \sqrt{2} \cdot I_L \cdot \cos(\omega \cdot t - \varphi) \quad i_{A,0}(t) = \sqrt{2} \cdot I_L \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \varphi - \frac{\pi}{6}\right) \quad (2.1)$$

$$i_{B,0}(t) = \sqrt{2} \cdot I_L \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \varphi + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \quad i_{B,0}(t) = \sqrt{2} \cdot I_L \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.2)$$

$$i_{C,0}(t) = \sqrt{2} \cdot I_L \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \varphi + \frac{4 \cdot \pi}{3}\right) \quad (2.3)$$

donde  $I_L$  es la corriente de línea eficaz,  $\omega$  es la frecuencia en radianes por segundo y  $\varphi$  es el factor de potencia.

Como se observa en la Figura 2.1, es casi imposible intuir la posibilidad de que exista una anomalía o fallo en la máquina eléctrica a partir del análisis de la respuesta temporal. 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. De las ecuaciones anteriores donde se formulaba la corriente de una fase, se puede extraer 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 de este caso real resulta a 50 Hz (Puche, 2008).

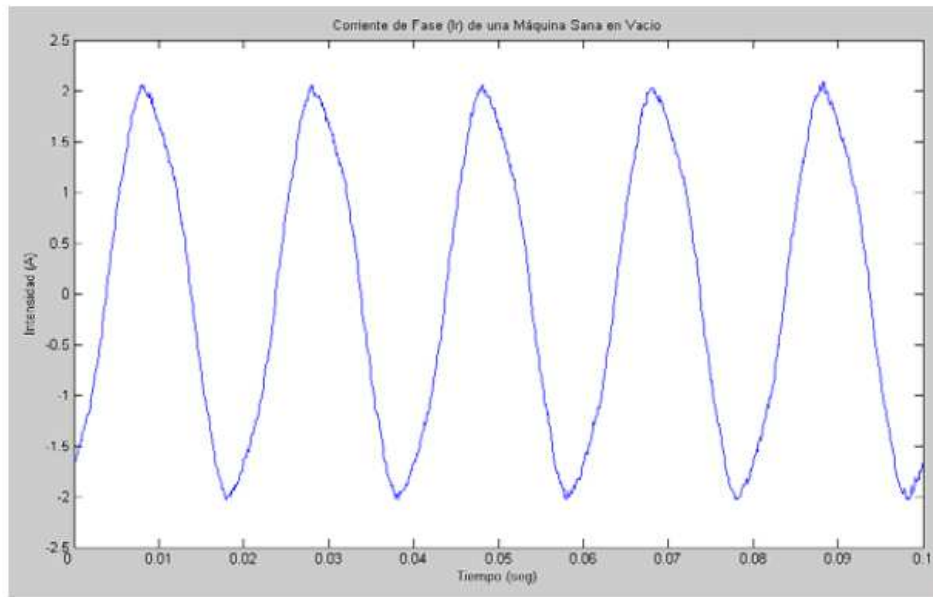


Figura 2.1. Representación temporal de la corriente de una fase de una máquina eléctrica sin fallo en vacío.

### 2.1.2 Justificación Teórica en Máquina con fallo.

En una máquina que presenta una anomalía o un fallo, la corriente estatórica ya no sólo posee la componente fundamental en función de la velocidad de giro de la misma, sino que además posee una componente espectral característica del fallo o anomalía que posea. Así pues, la corriente estatórica sufre una modulación como consecuencia del fallo o anomalía, es decir la señal de la corriente se modula con la frecuencia característica del fallo. De esta forma se puede escribir la corriente estatórica como:

$$i_A(t) = i_{A,0}(t) \cdot [1 + m \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)] \quad (2.4)$$

$m$  = índice de modulación.

$\omega_0$  = frecuencia angular característica del fallo

$$i_A(t) = I \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot [1 + m \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)] \quad (2.5)$$

Operando se obtiene:

$$i_A(t) = I \cdot \cos(\omega \cdot t) + I \cdot m \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \quad (2.6)$$

Aplicando la transformación de la suma de los cosenos en un producto de cosenos.

$$\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta) = 2 \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) \quad (2.7)$$

Se obtiene que:

$$i_{A(t)} = I \cdot \cos(\omega \cdot t) + \frac{I}{2} \cdot m \cdot [\cos((\omega + \omega_0) \cdot t) + \cos((\omega - \omega_0) \cdot t)] \quad (2.8)$$

De la ecuación anterior se puede concluir que cuando se analice su espectro de frecuencias se obtendrán tres frecuencias correspondientes a los tres términos que aparecen en la ecuación anterior. El primero correspondiente a la frecuencia de giro de la máquina de inducción, el segundo a la frecuencia de giro más la frecuencia característica del fallo y el tercero a la frecuencia de giro de la máquina menos la frecuencia característica del fallo.

Si se representa la corriente que circula por el estator de una máquina eléctrica con fallo a lo largo del tiempo, tal y como se muestra en la Figura 2.2, en ella no se observa ninguna diferencia apreciable con respecto a la forma de onda representada en la Figura 2.1 correspondiente a la corriente de una máquina eléctrica sin fallo. Por tanto, se puede concluir que en el dominio temporal de la señal la intensidad del estator no aporta una forma clara de detectar y diagnosticar fallos.

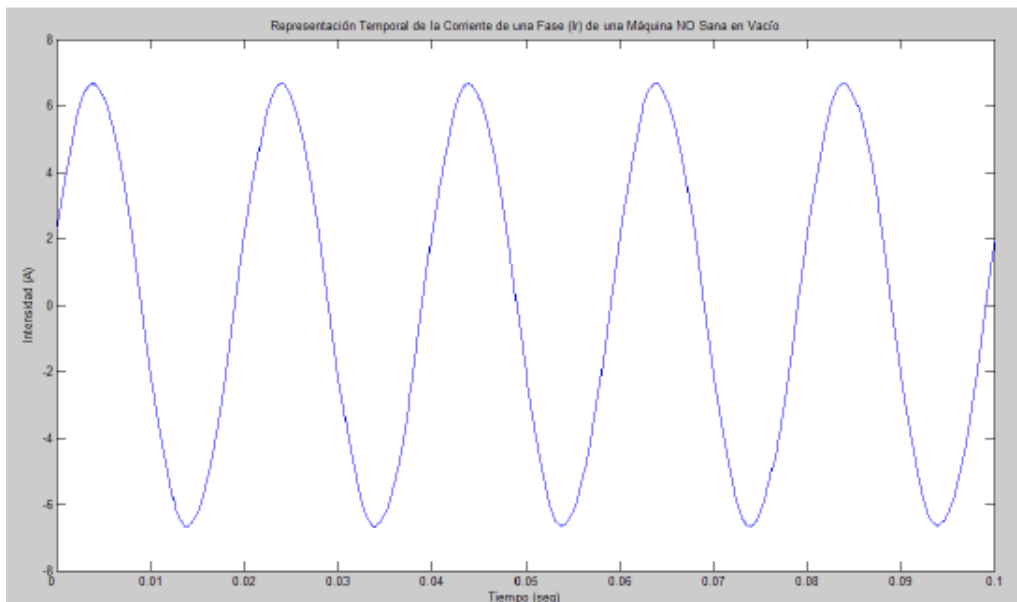


Figura 2.2. Representación temporal de la corriente de una fase de una máquina con fallo conocido en vacío.

### 2.1.3 Analisis espectral

Si ahora se realiza la transformada al dominio de la frecuencia de la señal, se deben observar como mínimo las tres frecuencias comentadas en el párrafo anterior referentes a la última ecuación.

En la Figura 2.3 se representa el espectro frecuencial de la corriente del estator, representada en la Figura 2.2 frente al tiempo, de una máquina eléctrica que posee algún fallo o anomalía. En la respuesta temporal no se puede apreciar ningún fallo mientras que en el dominio de la frecuencia sí aparecen frecuencias diferentes de la fundamental de la máquina, y estas pueden coincidir con alguna frecuencia de fallo.

En la Figura 2.3 se destacan tres picos fundamentales. En el pico central se encuentra la frecuencia de giro de la máquina, los otros dos picos dependen de la frecuencia del fallo, que en este caso es una excentricidad estática provocada por el desplazamiento de las tapas. Estas frecuencias son la suma o la resta a la frecuencia de giro y la frecuencia característica del fallo. Esta técnica se utiliza para la detección y diagnóstico de fallos en máquinas eléctricas con mejoras frente a los métodos tradicionales y sirve como referente al desarrollo de nuevas técnicas más precisas (Guldemir, 2003), (Elawgali, 2004), (Puche, 2008).

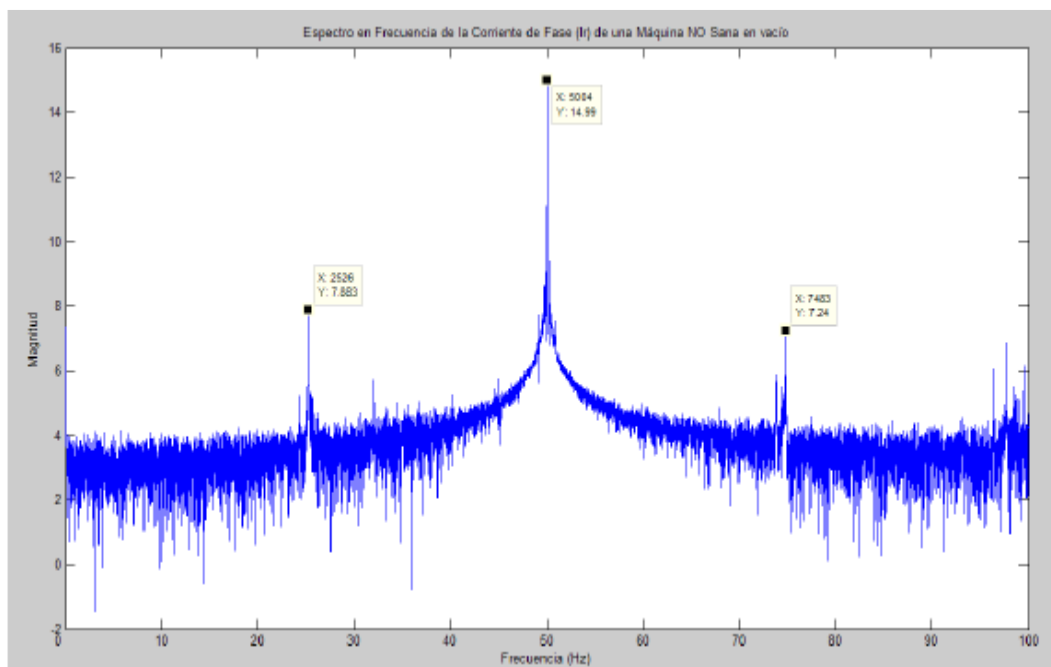


Figura 2.3. Representación en frecuencia de la corriente de una fase de una máquina con fallo conocido en vacío.



## 2.2 Transformada Rápida de Fourier (FFT).

La Transformada de Fourier permite, mediante el análisis de la respuesta de frecuencia, determinar varias fallas, aunque se dificulta su análisis para señales cambiantes en el tiempo. Esta técnica posee otros inconvenientes como por ejemplo el efecto de dispersión, lo cual no es más que un enmascaramiento en torno a la frecuencia fundamental del giro de la máquina. Además se deben tener en cuenta factores y algunos parámetros a la hora de realizar la captura, como tiempo de muestreo, la ventana de discretización, etc. Aun así, es la principal técnica que se utiliza actualmente para la detección y diagnóstico de fallos en las máquinas eléctricas rotativas, sustituyendo al análisis de vibraciones, por simplicidad de medida y mejores resultados (Puche, 2008, Rosero García, 2011).

La transformada rápida de Fourier FFT es un algoritmo que reduce el tiempo de cálculo de  $n^2$  pasos a  $n \cdot \log_2(n)$ . El único requisito es que el número de puntos en la serie tiene que ser una potencia de 2 ( $2^n$  puntos) (Acocella and Tierra, 1995).

La implementación de la ecuación (2.9) involucra un número de sumas y multiplicaciones complejas que es proporcional a  $N^2$ . Lo anterior se puede apreciar fácilmente ya que para cada uno de los  $N$  valores de  $\mu$ , la expansión de la sumatoria requiere  $N$  multiplicaciones complejas de  $f(x)$  por  $e^{-j2\pi\mu x/N}$  y  $(N - 1)$  sumas de resultados.

$$F(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \cdot e^{-j2\pi\mu x/N} \quad (2.9)$$

El término  $e^{-j2\pi\mu x/N}$  puede ser calculado de una vez y almacenado en una tabla para las aplicaciones subsecuentes. Por tal razón, la multiplicación de  $\mu$  por  $x$  en este término no se contabiliza normalmente como parte de la implementación. Se demuestra en lo que sigue que la descomposición de (2.9) permite reducir el número de sumas y multiplicaciones a un valor proporcional a  $N \cdot \log_2 N$ . El procedimiento de descomposición se denomina Algoritmo de Transformada Rápida de Fourier.

El algoritmo que se plantea está basado en el método denominado “doblamiento sucesivo”.

Para simplificar las expresiones, la ecuación (2.9) se reescribe:

$$F(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) W_N^{\mu x} \quad (2.10)$$

donde

$$W_n = e^{-j2\pi/N} \quad (2.11)$$

y  $N$  se supone de la forma:

$$N = 2^n \quad (2.12)$$

con  $N$  entero positivo. Entonces puede expresarse:

$$N = 2M \quad (2.13)$$

Con  $M$  también entero positivo. Sustituyendo (2.13) en (2.10) se tiene:

$$\begin{aligned} F(\mu) &= \frac{1}{2M} \sum_{x=0}^{2M-1} f(x) W_N^{\mu x} \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(x) W_{2M}^{\mu(2x)} + \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(2x+1) W_{2M}^{\mu(2x+1)} \right\} \end{aligned} \quad (2.14)$$

A partir de (2.11),  $W_{2M}^{2\mu x} = W_{2M}^{\mu x}$ , la ecuación (2.14) puede expresarse:

$$F(\mu) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(2x) W_M^{\mu x} + \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(2x+1) W_M^{\mu x} W_{2M}^{\mu x} \right\} \quad (2.15)$$

Si se define:

$$F_{par}(\mu) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(2x) W_M^{\mu x} \quad (2.16)$$

Para  $\mu = 0, 1, \dots, M-1$  y:

$$F_{impar}(\mu) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(2x+1)W_M^{\mu x} \quad (2.17)$$

para  $\mu = 0, 1, \dots, M-1$ , entonces la ecuación (2.15) se hace:

$$F(\mu) = \frac{1}{2} \{F_{par}(\mu) + F_{impar}(\mu)W_{2M}^{\mu}\} \quad (2.18)$$

También, dado que  $W_M^{\mu+M} = W_M^{\mu}yW_{2M}^{\mu+M} = -W_{2M}^{\mu}$

$$F(\mu + M) = \frac{1}{2} \{F_{par}(\mu) + F_{impar}(\mu)W_{2M}^{\mu}\} \quad (2.19)$$

La ecuación (2.19) es la que se implementa para realizar los análisis de FFT.

### 2.3 Frecuencias características de los fallos.

Anteriormente se analizó que en una máquina con fallos, ya no sólo aparece la componente fundamental sino que además posee una componente espectral característica del fallo. En este acápite se analizarán las frecuencias que caracterizan algunos de estos fallos.

**Fallos en el estator.** Estos fallos son los que se producen en el estator o en la alimentación de este, siempre antes de producirse la conversión electromagnética. Principalmente se pueden clasificar en dos tipos, los producidos en el devanado y los externos al estator en la alimentación de la máquina de inducción. A continuación se enumeran los diferentes fallos posibles:

- Cortocircuito entre espiras contiguas. El motor puede seguir funcionando durante un tiempo incierto.
- Cortocircuito entre bobinas de una misma fase. El motor puede seguir funcionando durante un tiempo incierto.
- Cortocircuito entre fases distintas. El motor deja de funcionar y la protección del motor si lo hubiera desconecta la potencia de alimentación del motor.

- Circuito abierto en una fase. El motor puede llegar a seguir operando en función de la carga y del equipo de protección que le acompañe.
- Cortocircuitos entre fase y tierra.
- Fallos en el aislamiento.

**Fallos en el rotor.** El rotor de un motor de inducción de jaula de ardilla está constituido por un conjunto de barras unidas en ambos extremos por dos anillos, denominados anillos de cortocircuito. El núcleo magnético del rotor está constituido por chapas magnéticas, aisladas y apiladas, que ocupan el espacio entre las barras. Las jaulas de este tipo pueden estar constituidas de diferentes tecnologías.

La única posibilidad de que circule una corriente en el rotor es a través de las propias barras, las cuales se encuentran perfectamente aisladas de las chapas de circuito magnético. El reducido tamaño de las holguras entre las barras y las chapas crea una resistencia de contacto muy baja, por lo cual se posibilita la circulación de corrientes entre las barras rotóricas y las chapas del núcleo en dirección perpendicular a las primeras. Estas corrientes generaran un nuevo flujo de corriente distribuido a lo largo del rotor circulando transversalmente a través de las chapas magnéticas entre las diferentes barras que conforman la jaula.

Las asimetrías en la jaula rotórica de una máquina eléctrica de inducción suelen estar relacionadas con las altas temperaturas alcanzadas en el rotor y con las elevadas fuerzas centrífugas que soportan tanto las barras como los anillos, especialmente durante los regímenes transitorios.

Los problemas pueden iniciarse incluso durante la construcción de las máquinas eléctricas debido a la fundición defectuosa en los rotores construidos en aluminio, o a uniones defectuosas en el caso de anillos de cortocircuito soldados o ensamblados, apareciendo así juntas de alta resistencia eléctrica o porosidades, produciendo que esos puntos sean de elevada temperatura.

La fractura o rotura de las barras suelen iniciarse en las proximidades de la unión con el anillo de cortocircuito o inclusive en el mismo anillo, principalmente porque en este punto es donde más se acumulan las tensiones mecánicas de la estructura, recordar que las barras del rotor soportan las fuerzas de frenado y aceleración de la máquina eléctrica de inducción.

Las roturas de barras son producidas principalmente por:

- Esfuerzos térmicos debidos a sobrecargas térmicas y desbalanceadas, zonas calientes, o excesivas pérdidas.
- Esfuerzos magnéticos a causa de fuerzas electromagnéticas, ruido electromagnético, vibraciones, fuerzas magnéticas desbalanceadas.
- Problemas debidos a esfuerzos residuales.
- Esfuerzos dinámicos emergentes del par producido en el eje, fuerzas centrífugas y esfuerzos cíclicos.
- Esfuerzos ambientales causados por ejemplo por la contaminación y abrasión de los materiales de rotor debido a la humedad y productos químicos.
- Esfuerzos mecánicos debido a laminaciones, fatigas, fallos en los cojinetes.

La rotura de barras genera una asimetría en la jaula rotórica de un motor de inducción, lo cual produce un campo magnético rotativo de sentido contrario al giro del rotor (Castelli Lemez and Andrade, 2007).

**Fallos externos.** Esta clasificación engloba los fallos que se producen por una causa externa a la máquina eléctrica rotativa, como pueden ser los causados debido a fallos en la alimentación de la máquina, debidos a variaciones en la carga de la máquina, etc.

En muchas aplicaciones industriales las máquinas eléctricas de inducción se encuentran alimentadas a través de sistemas electrónicos encargados de su regulación. Estos sistemas comúnmente utilizados para realizar los arranques en las máquinas eléctricas y solventar el aumento de la corriente que experimentan entre otras posibilidades, tales como controlar la frenada, regular diferentes velocidades, etc.

Por lo tanto, estos sistemas externos pueden inducir fallos a la máquina eléctrica y deberán ser tenidos en cuenta a la hora de realizar un estudio de diagnosis y detección de fallos de la máquina eléctrica.

Si el Par de la carga varía con la posición del rotor, la corriente debe contener componentes espectrales las cuales deben coincidir con este efecto. En una máquina eléctrica ideal donde los enlaces de flujo del estator son puramente sinusoidales, cualquier oscilación que se produzca en el par de la carga y a la velocidad de giro del rotor  $m \cdot f_r$  producirá unas componentes espectrales en la corriente del estator.

Siendo habitual que en sistemas donde el par de la carga varía en el tiempo, estas frecuencias enmascaren otros tipos de fallos, resultando así difícil discernir si la frecuencia característica

es debida a un posible fallo, excentricidad o rotura de barras, o es una variación de la carga. No obstante existen estudios en los cuales es posible detectar la rotura de barras aun cuando existen armónicos inducidos por la variación de la carga de la máquina eléctrica.

En la tabla 2.1 se resume lo antes tratado.

Tabla 2.1. Frecuencias características de los principales fallos que se producen en las máquinas eléctricas rotativas de inducción.

Tipo de fallo		Frecuencia Característica	
ELÉCTRICOS	ESTATOR	En los devanados (Aislamiento de la Máquina)	$f_s = \left(k \pm n \cdot \frac{(1-s)}{p}\right) \cdot f$
	ROTOR	Rotura de Barras y Anillos de Cortocircuito	$f_B =  f_1 \cdot (1 \pm 2 \cdot k \cdot s)  \quad k = 1,2,3 \dots$ $f_1 = N_s \cdot p$
	EXTERNOS	Electrónica de Alimentación	No frecuencia Característica.
		Efectos de la Carga	$f_{carga} = f_s \pm m \cdot f_r = f_s \left  \left(1 \pm m \cdot \frac{(1-s)}{p}\right) \right $

Dónde “f” es la frecuencia de alimentación, “p” es el número de pares de polos, “s” es el deslizamiento,  $N_s$  es la velocidad sincrónica,  $m$  es el índice de modulación y “k” y “n” son constantes, de tal forma que  $n=1, 2,3,\dots$  Y  $k=1, 3,5,\dots$

En este apartado, además de clasificarse los fallos, sus causas y efectos, se han tratado las frecuencias características de cada uno de los fallos. Por tanto mediante estas frecuencias se puede determinar el tipo de fallo o anomalía que se ha producido tras analizar el espectro frecuencial de la corriente estatórica. Este resultado será utilizado en el software.

#### 2.4 Análisis de correlación.

El análisis de correlación emplea métodos para medir la significación del grado o intensidad de asociación entre dos o más variables. El concepto de correlación está estrechamente vinculado al concepto de regresión, pues, para que una ecuación de regresión sea razonable los puntos muestrales deben estar ceñidos a la ecuación de regresión; además el coeficiente de correlación debe ser (Hair and Suárez, 1999):

- grande cuando el grado de asociación es alto (cerca de +1 o -1), y pequeño cuando es bajo (cerca de 0).
- independiente de las unidades en que se miden las variables.

### **Coefficiente de correlación Lineal Simple (r).**

Es un número que indica el grado o intensidad de asociación entre las variables X e Y. Su valor varía entre -1 y +1; esto es:  $-1 \leq r \leq 1$ .

Si  $r = -1$ , la asociación es perfecta pero inversa; es decir, a valores altos de una variable le corresponde valores bajos a la otra variable, y viceversa.

Si  $r = +1$ , también la asociación es perfecta pero directa.

Si  $r = 0$ , no existe asociación entre las dos variables.

Luego puede verse que a medida que r se aproxime a -1 o +1 la asociación es mayor, y cuando se aproxima a cero la asociación disminuye o desaparece.

El coeficiente de correlación está representado por la letra  $r$  y se obtiene tipificando el promedio de los productos de las puntuaciones diferenciales de cada caso (desviaciones de la media) en las dos variables correlacionadas:

$$r_{xy} = \frac{\sum x_i \cdot y_i}{n \cdot S_x \cdot S_y} \quad (2.20)$$

( $x_i$  e  $y_i$  se refieren a las puntuaciones diferenciales de cada par; n al número de casos; y  $S_x$  y  $S_y$  a las desviaciones típicas de cada variable).

### **Coefficiente de Determinación (R<sup>2</sup>).**

El coeficiente  $R^2$  mide el porcentaje de variación en la variable respuesta, explicada por la variable independiente. De la descomposición de la suma de cuadrados total, se obtiene:

$$SCT = SCR + SCE \quad (2.21)$$

donde SCT = Suma de cuadrados total, SCR = Suma de cuadrados de la regresión, y SCE = Suma de cuadrados residual (error).

Dividiendo ambos miembros por la SCT, se tiene:

$$1 = \frac{SCR}{SCT} + \frac{SCE}{SCT} \quad (2.22)$$

de este resultado, se define el coeficiente de determinación como:

$$R^2 = 1 - \frac{SCE}{SCT} = \frac{SCR}{SCT} \quad (2.23)$$

$$R^2 = \frac{SC \text{ regresión}}{SC \text{ total}} \quad (2.24)$$

Como  $SCR \leq SCT$ , se deduce que  $0 \leq R^2 \leq 1$ .

### Interpretación de $R^2$ :

Se interpreta como una medida de ajuste de los datos observados y proporciona el porcentaje de la variación total explicada por la regresión.

$R^2$  es un valor positivo, expresado en porcentaje es menor de 100.

También, se puede obtener el  $R^2$  ajustado que es la relación entre cuadrados medios, así:

$$R^2 \text{ ajustado} = 1 - \frac{CME}{CM \text{ Total}} \quad (2.25)$$

Este valor podría ser negativo en algunos casos.

Lo que se espera que ambos  $R^2$ , resulten similares, para dar una confianza al coeficiente de determinación.

### 2.5 Valor eficaz de la tensión. RMS (*Root Mean Square*)

Este método se basa en el análisis de los valores instantáneos de las magnitudes que definen el comportamiento de la máquina eléctrica rotativa (Sin et al., 2003), (Riley et al., 1999).

Por ejemplo, se usa la tensión de alimentación fase-neutro de la máquina eléctrica rotativa, para la detección de fallos en la misma. Si la máquina se considera sin fallo se debe cumplir que la suma de las tensiones fase-neutro debe responder a la ecuación:



$$\bar{V}_{SUM} = \bar{V}_R + \bar{V}_S + \bar{V}_T = Z_R \cdot \bar{I}_R + Z_S \cdot \bar{I}_S + Z_T \cdot \bar{I}_T \quad (2.26)$$

Como la máquina eléctrica está sin fallo, ha de estar balanceada y por tanto las tres impedancias han de ser iguales, con lo que:

$$Z_R = Z_S = Z_T \quad (2.27)$$

Se sabe que la suma de las tres corrientes ha de ser cero:

$$\bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T = 0 \rightarrow \bar{I}_n = 0 \quad (2.28)$$

Por tanto, si se sustituye las dos ecuaciones anteriores en la de la suma total, se obtiene que:

$$\bar{V}_R + \bar{V}_S + \bar{V}_T = 0 \quad (2.29)$$

De esta forma, si se miden las tres tensiones y las tres intensidades y se suman las tensiones por un lado y las intensidades por el otro, si la máquina está sin fallo, la suma de la tensión y la suma de la intensidad debe valer cero. Pero esto sólo suele ocurrir en máquinas ideales, ya que en las máquinas reales si la alimentación esta desbalanceada o cualquier pequeña variación constructiva harán que el sumatorio no valga cero.

De esta forma si la sumatoria no vale cero, puede ser porque existe algún fallo o porque hay alguna pequeña anomalía con lo cual este método no resulta muy fiable para la detección de averías. Además suponiendo que no existiese ninguna anomalía en la alimentación, ni constructiva, si la sumatoria no valiese cero no se sabría qué tipo de avería o fallo está teniendo lugar en la máquina eléctrica rotativa.

Si se realiza el análisis de dicha sumatoria de tensión o corriente en frecuencia, mediante la transformada de Fourier, si existe un fallo se detecta mediante la presencia de una frecuencia característica diferente de la fundamental, mientras que en el tiempo no se puede ubicar el fallo (Sin et al., 2003).

## 2.6 Software para detección de fallas de motores eléctricos.

El software trabaja bajo el entorno de Matlab, por lo cual es indispensable disponer del mismo para su funcionamiento. Para comenzar a analizar algún o algunos motores, se

necesita que la información de los mismos esté en archivos separados, es decir, uno por cada motor, y que en ellos se encuentren los datos del tiempo, corriente, tensión y velocidad. Es necesario que el archivo que posea los datos de cualquier motor tenga como nombre de archivo algún tipo de nomenclatura que me permita identificar los datos con el mismo, esto es solo una sugerencia, ya que el software realiza gráficos y en los mismos se dispone de una leyenda, la cual toma el nombre del archivo. Otro punto a tener en cuenta es que el software solicita la ubicación de estos archivos (si no están en el directorio de trabajo), con lo que es necesario ingresar en forma seguida y mediante el teclado, la ruta de acceso correspondiente. Otras fuentes también han hecho sus aportes acerca de estos temas como (Costa, 2006).

El software nos permite visualizar el comportamiento de variables del motor tales como, tensión, velocidad, corriente y potencia y realizarles análisis basados en la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y correlación.

### **2.5.1 Coeficiente de correlación.**

El Coeficiente de Correlación es un índice estadístico dado por el análisis de correlación que permite definir de forma más concisa la relación entre dos variables. Su resultado es un valor que fluctúa entre  $-1$  (correlación perfecta de sentido negativo) y  $+1$  (correlación perfecta de sentido positivo). Cuanto más cercanos a cero sean los valores, indican una mayor debilidad de la relación o incluso ausencia de correlación entre las dos variables. El análisis se muestra en pantalla con tres posibilidades de diagnóstico: “Correcto”, “Posible falla” o “No se puede determinar por este método”. El diagnóstico tomado como “posible falla” tiene en cuenta aquel análisis de correlación que dio menor que 0.4; el tomado como “correcto” contempla un análisis de correlación con un número mayor a 0.7 y el tomado como “No se puede determinar por este método” corresponde a aquel análisis de correlación que dio entre 0.4 y 0.7.

### **2.7 Consideraciones parciales**

La Transformada Rápida de Fourier (FFT) permite realizar un análisis en el dominio de la frecuencia a las componentes que conforman dicha corriente. En el mismo se observa la componente fundamental de frecuencia que predominará por encima de todas y corresponde a la velocidad de giro de la máquina eléctrica, en condición sin fallo. En caso de fallos se

observarás tres picos fundamentalmente. En el pico central se encuentra la frecuencia de giro de la máquina, los otros dos picos dependen de la frecuencia del fallo.

La detección y diagnóstico de fallos en las máquinas eléctricas se basa en el análisis en régimen permanente de la medida de la magnitud seleccionada, generalmente es la corriente estática. Mediante el análisis de esta señal, se obtienen los diferentes parámetros que la caracterizan, identifican y permiten diferenciarla con respecto a otras.

Las frecuencias de fallos son analizadas y es posible identificar a través de ellas que tipo de fallo presenta el motor eléctrico.

El software realizado en Matlab, implementa los algoritmos abordados en este trabajo. En el próximo capítulo se analizarán resultados de su aplicación.

### CAPÍTULO 3. PROGRAMA PARA EL ANÁLISIS Y DETECCIÓN DE FALLAS EN MOTORES ELÉCTRICOS

En el presente capítulo se tomará el modelo dinámico de un motor de inducción para realizarle pruebas, donde se puedan identificar sus principales parámetros (velocidad, corriente, voltaje etc.). Con estos datos obtenidos se pasará a la aplicación de algoritmos tanto computacionales como matemáticos. En los mismos estarán implícitos métodos de correlación y Transformada Rápida de Fourier (FFT), esto permitirá detectar las fallas de manera más eficiente.

#### 3.1 Descripción del motor empleado.

El ejemplo analizado en esta sección es un motor de inducción asincrónico de tres fases con carga mecánica y 3 HP de potencia mecánica. El mismo es alimentado por una fuente trifásica de 460 V. Se puede observar que por sus salidas se grafican valores tales como corriente en el estator, Velocidad del rotor, Voltaje en el estator, y torque electromagnético (Figura 3.1).

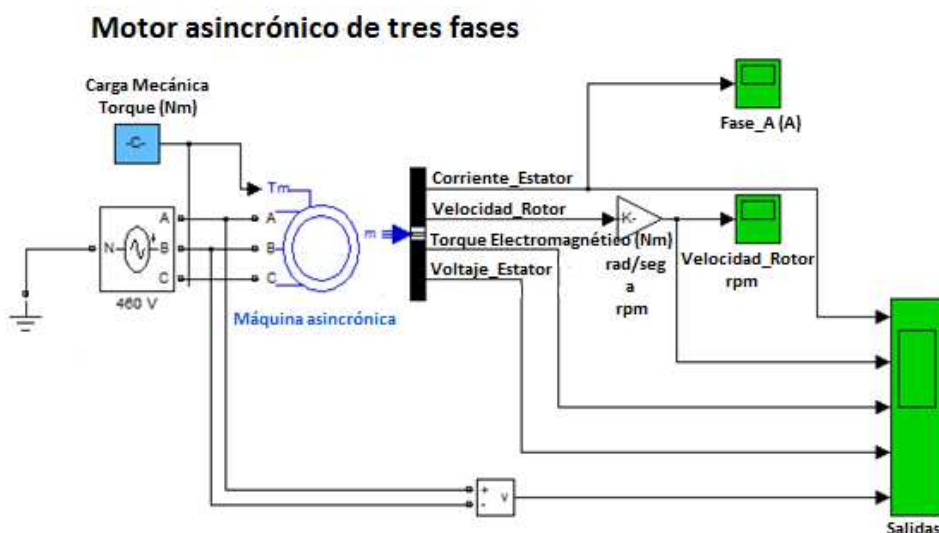


Figura 3.1. Motor de inducción asincrónico de tres fases con carga mecánica.

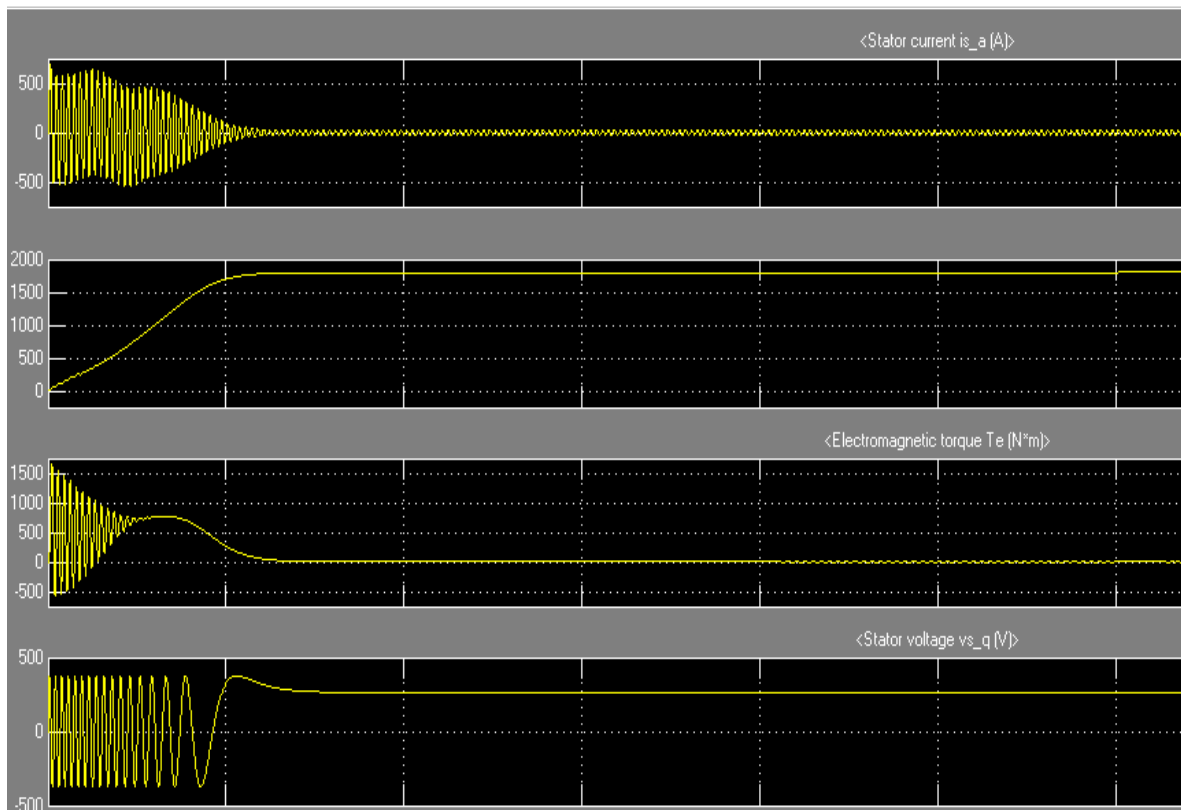


Figura 3.2. Salidas del motor obtenidas según la simulación.

### 3.2 Análisis del motor sin fallos según el software implementado.

Se ejecuta el Matlab y posteriormente el menú principal, en cual consta de tres opciones, vale aclarar que para poder acceder a las opciones es necesario teclear el número de la opción y presionar la tecla ENTER. Ellas son:

```
#####
#####          MENU DE OPCIONES          #####
#####

1) Menu de Carga de Datos
2) Volver a Matlab
3) Salir de Matlab

Elija la opción deseada:
```

Esta opción a su vez ofrece dos opciones más:

**Menú de Carga:** permite cargar la ubicación de los archivos.

```
#####
#### MENU DE CARGA ####
#####

1) Cargar la ubicacion de los archivos
2) Volver a Menu Principal

Elija la opcion deseada:
```

Aquí aparecerá un mensaje en pantalla que nos pedirá la cantidad de archivos a ingresar (se recuerda que solo se permite un máximo de tres archivos) y a continuación pedirá que se ingrese la dirección completa del archivo tantas veces como cantidad de archivos se ingresaron para comparar.

**Menú de análisis:** Una vez ingresadas las direcciones correctamente, se pasará automáticamente al menú de análisis, que abarca varias opciones, las cuales se pueden ver a continuación:

```
#####
#####          MENU DE ANALISIS          #####
#####

1) Análisis de Corriente
2) Análisis de Tensión
3) Análisis de Potencia
4) Análisis de Velocidad
5) Análisis de FFT de Corriente
6) Análisis de FFT de Tensión
7) Análisis de FFT de Potencia
8) Análisis Completo
9 Análisis de Correlacion
10) Volver a Menu de Carga
```

Se selecciona la opción deseada y a continuación se puede visualizar una gráfica en detalle de lo antes solicitado.

### 3.2.1 Análisis de corriente.

Al seleccionar la opción de “Análisis de corriente” aparecerá la gráfica de las variaciones de la corriente a través del tiempo, en forma individual si se eligió un análisis individual o una gráfica compuesta si se eligió la opción de ingresar más de un archivo (Figura 3.2).

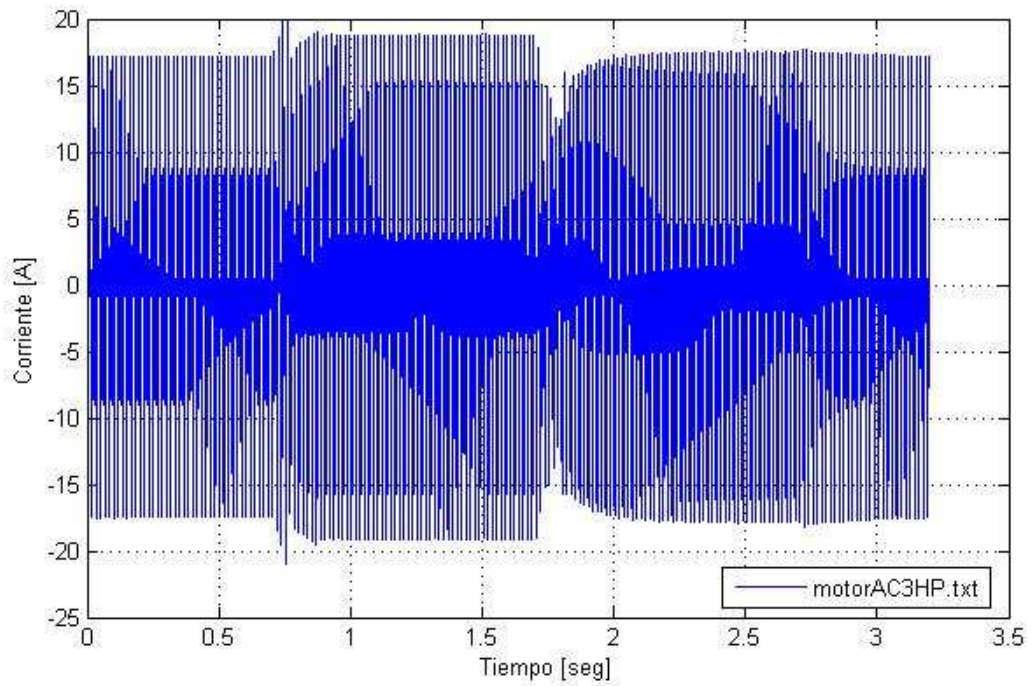


Figura 3.3. Respuesta temporal de la corriente, en forma individual.

### 3.2.2 Análisis de tensión.

Al seleccionar la opción de “Análisis de tensión” aparecerá la gráfica de las variaciones de tensión a través del tiempo, en forma individual si se eligió un análisis individual o una gráfica compuesta si se eligió la opción de ingresar más de un archivo (Figura 3.3).

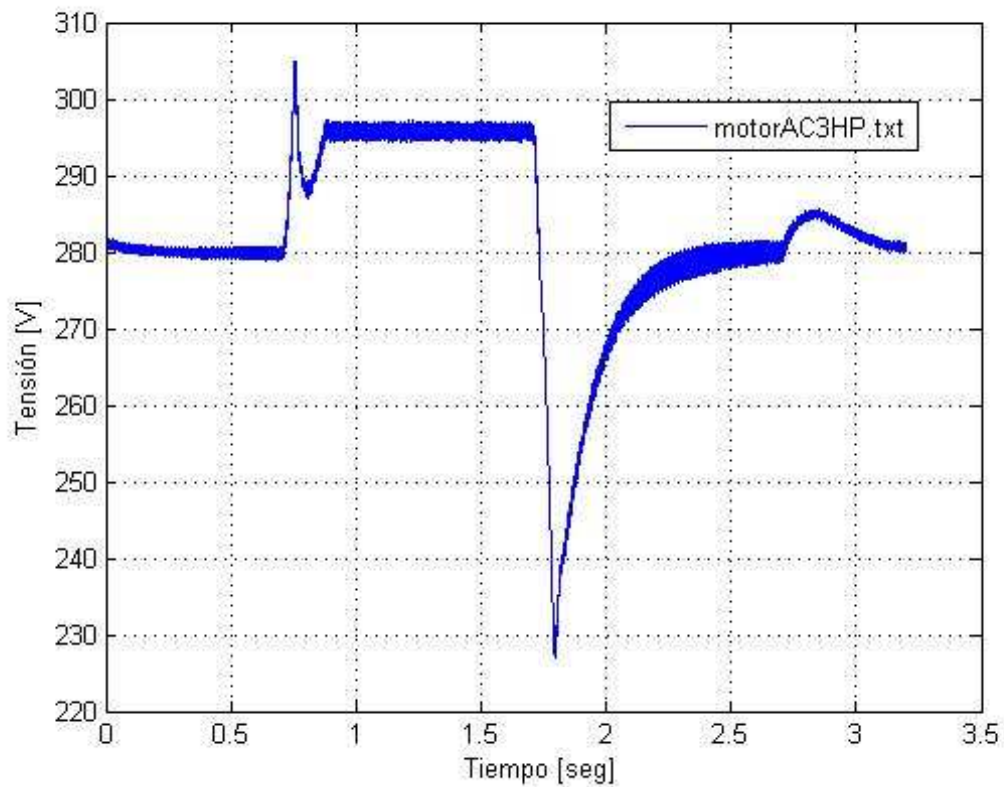


Figura 3.4. Respuesta temporal de la tensión, en forma individual.



### 3.2.3 Análisis de potencia.

Al seleccionar la opción de “Análisis de potencia” aparecerá la gráfica de las variaciones de potencia a través del tiempo, en forma individual si se eligió un análisis individual o una gráfica compuesta si se eligió la opción de ingresar más de un archivo (Figura 3.4).

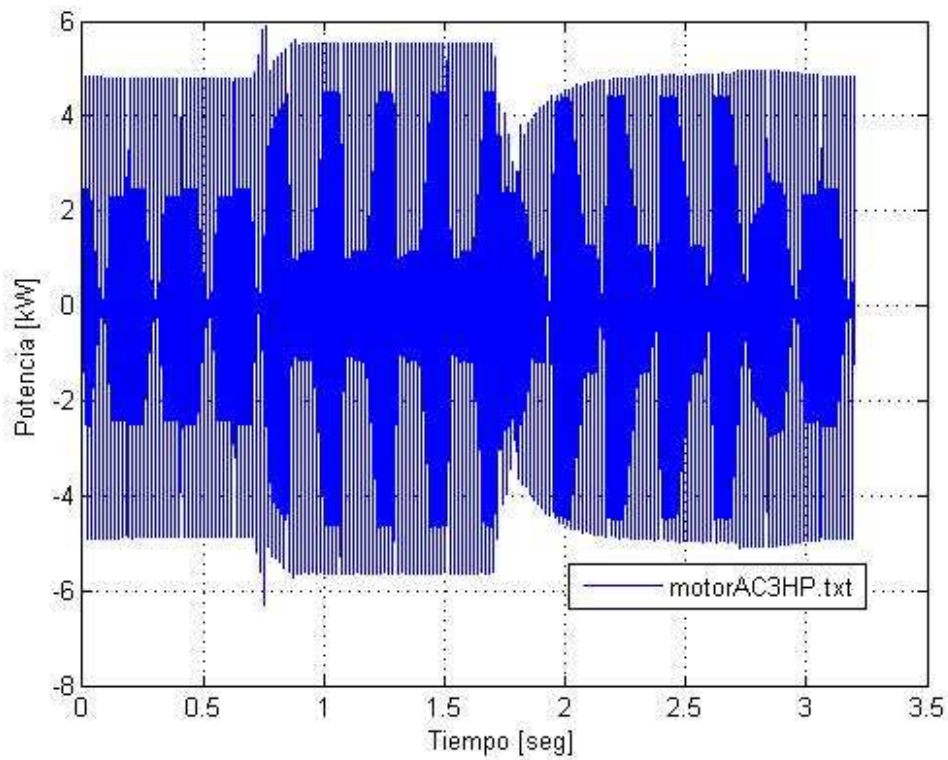


Figura 3.5. Respuesta temporal de la potencia, en forma individual.

### 3.2.4 Análisis de velocidad.

Al seleccionar la opción de “Análisis de velocidad” aparecerá la gráfica de las variaciones de velocidad a través del tiempo, en forma individual si se eligió un análisis individual o una gráfica compuesta si se eligió la opción de ingresar más de un archivo (Figura 3.4).

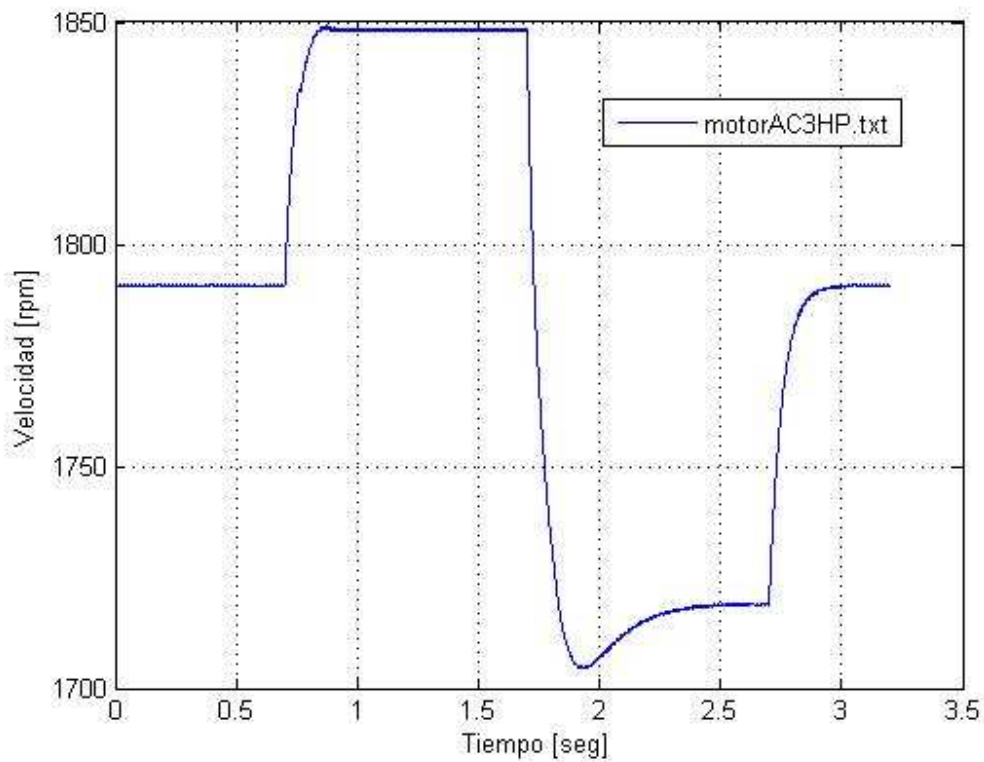


Figura 3.6. Respuesta temporal de velocidad, en forma individual.

### 3.2.5 Análisis FFT de corriente.

Se presenta una gráfica donde se aprecia el comportamiento según el análisis de la Transformada Rápida de Fourier de la corriente. En la misma no se muestra ningún tipo de anomalía respecto a la componente fundamental de frecuencia.

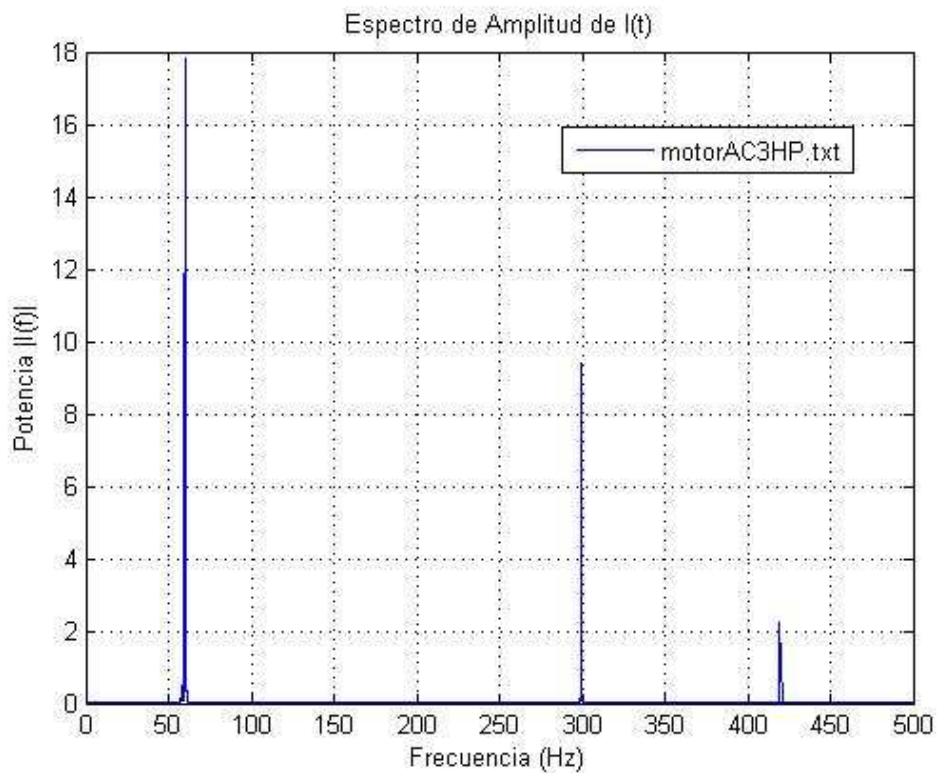


Figura 3.7. Comportamiento según el análisis de la Transformada Rápida de Fourier de la corriente.

### 3.2.6 Análisis FFT tensión.

Se presenta una gráfica donde se aprecia el comportamiento según el análisis de la Transformada Rápida de Fourier de la tensión. En la misma no se muestra ningún tipo de anomalía respecto a la componente fundamental de frecuencia.

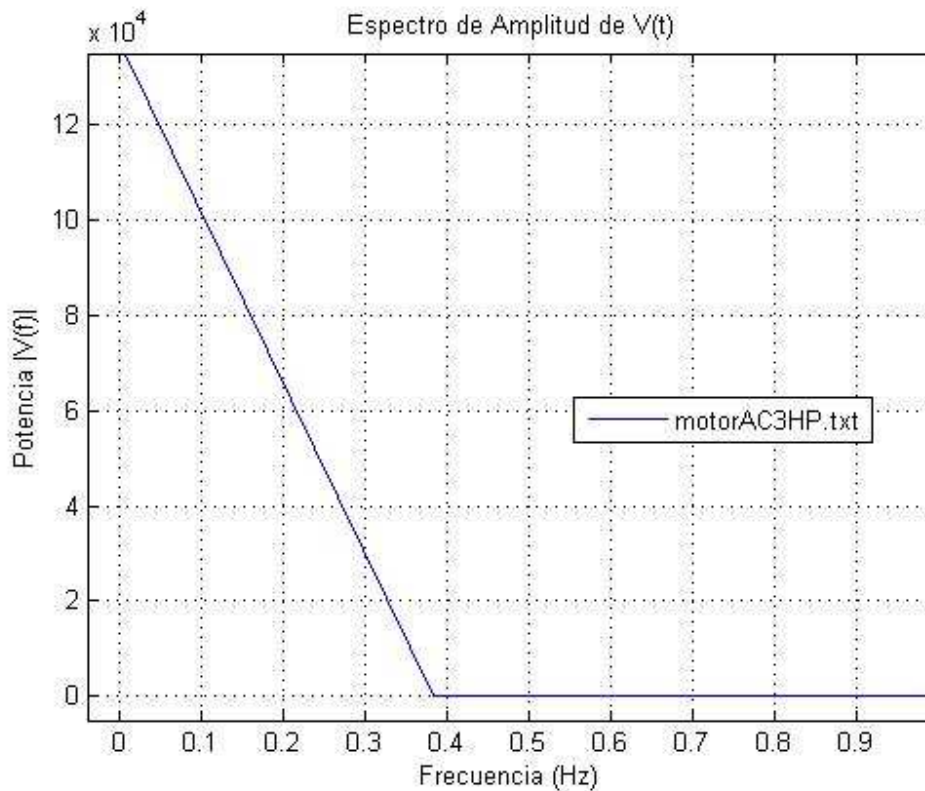


Figura 3.8. Comportamiento según el análisis de la Transformada Rápida de Fourier de la tensión.

### 3.2.7 Análisis FFT potencia.

Se presenta una gráfica donde se aprecia el comportamiento según el análisis de la Transformada Rápida de Fourier de la potencia. En la misma no se muestra ningún tipo de anomalía respecto a la componente fundamental de frecuencia.

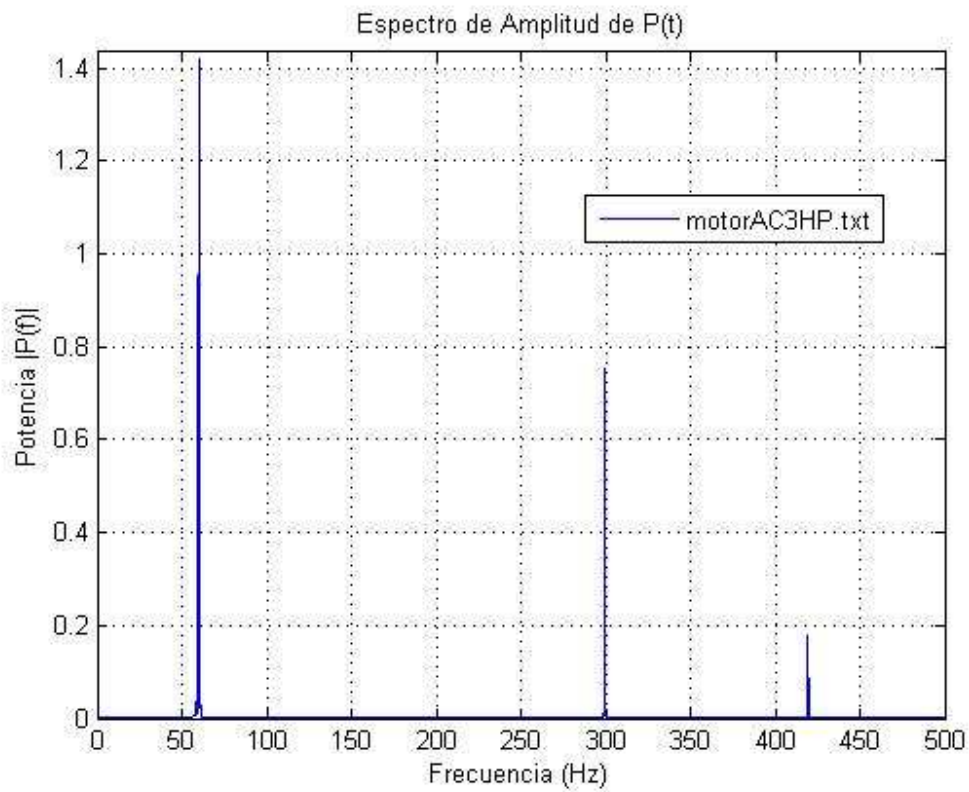


Figura 3.9. Comportamiento según el análisis de la Transformada Rápida de Fourier de la potencia.

### 3.2.8 Análisis completo.

Se presenta un análisis individual si se ingresó un solo archivo o compuesto si se eligió la opción de ingresar más archivos, que abarca los siete análisis anteriores.

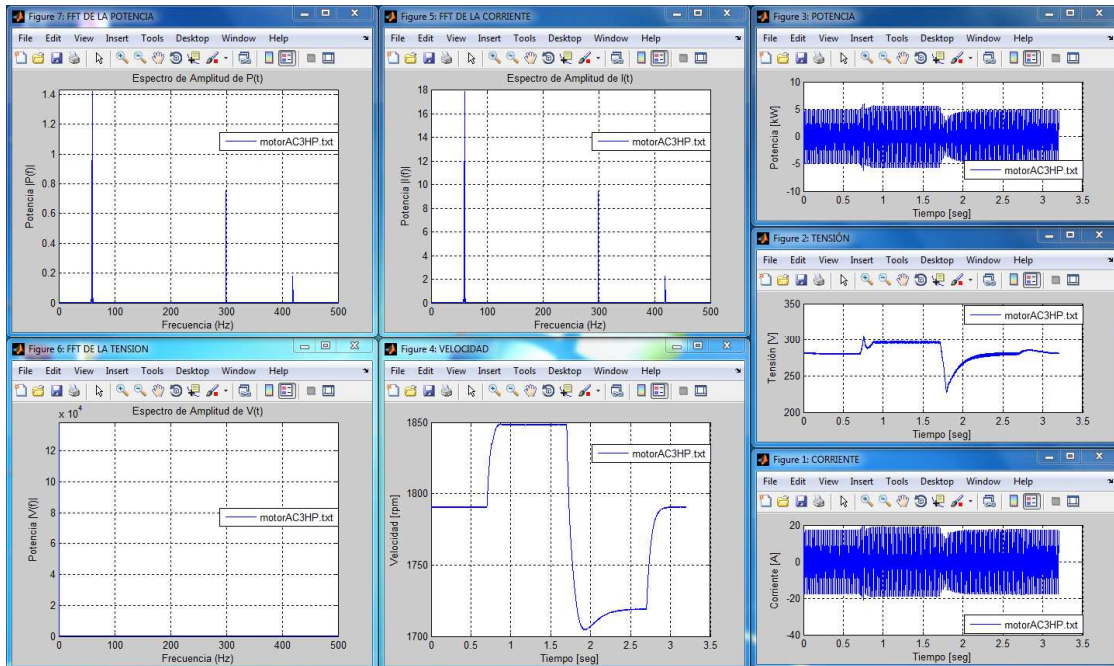


Figura 3.10. Análisis completo de las diferentes magnitudes del motor.

### 3.3 Prueba realizada al motor añadiéndole la componente fundamental de fallo.

Se presenta una gráfica donde se aprecia el comportamiento según el análisis de la Transformada Rápida de Fourier de la corriente. En esta figura destacan tres picos fundamentalmente. El pico central se encuentra a la frecuencia de giro de la máquina, los otros dos picos dependen de la frecuencia del fallo. Estos se localizan en  $-2Sf$  y  $2Sf$ , siendo  $f$  la frecuencia de alimentación y  $S$  el deslizamiento. Dichas frecuencias se les llamarán  $f_i$  frecuencia lateral inferior, y  $f_s$  armónico lateral superior.

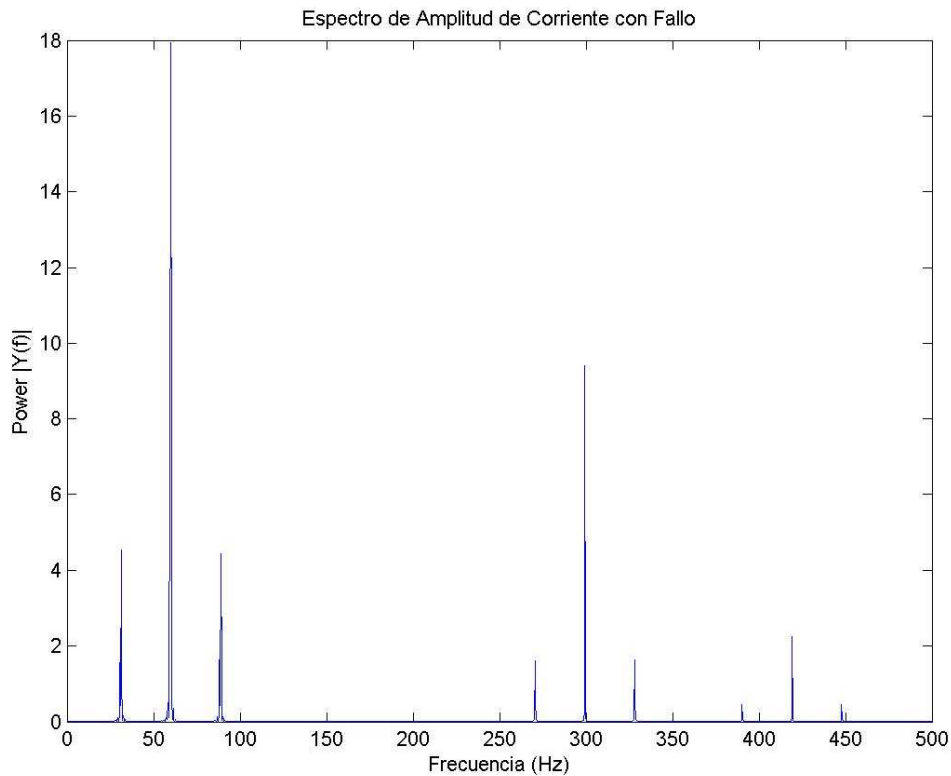


Figura 3.11. Análisis de corriente realizada al motor añadiéndole la componente fundamental de fallo.

### 3.3.1 Presentación de ambas gráficas superpuestas para analizar sus diferencias.

La grafica muestra la superposición de ambas señales de corriente con y sin fallas, en la misma se observan algunos máximos que coinciden con las frecuencias de fallo anteriormente estudiadas. Por un análisis detallado se pudo constatar que la causa de fallo provenía de un fallo eléctrico estático en los devanados (aislamiento de la máquina).

Del mismo se obtuvo que:

Tabla 3.1. Frecuencias reales y obtenidas a través de la prueba.

Frecuencias Reales		
Fa - Ff	Fa	Fa + Ff
30,8990	59,8907	88,501
Frecuencias Teóricas		
Fa - Ff	Fa	Fa + Ff
31,2000	60,0000	88,8000

Fa: Frecuencia de alimentación.

Ff: Frecuencia de fallo.

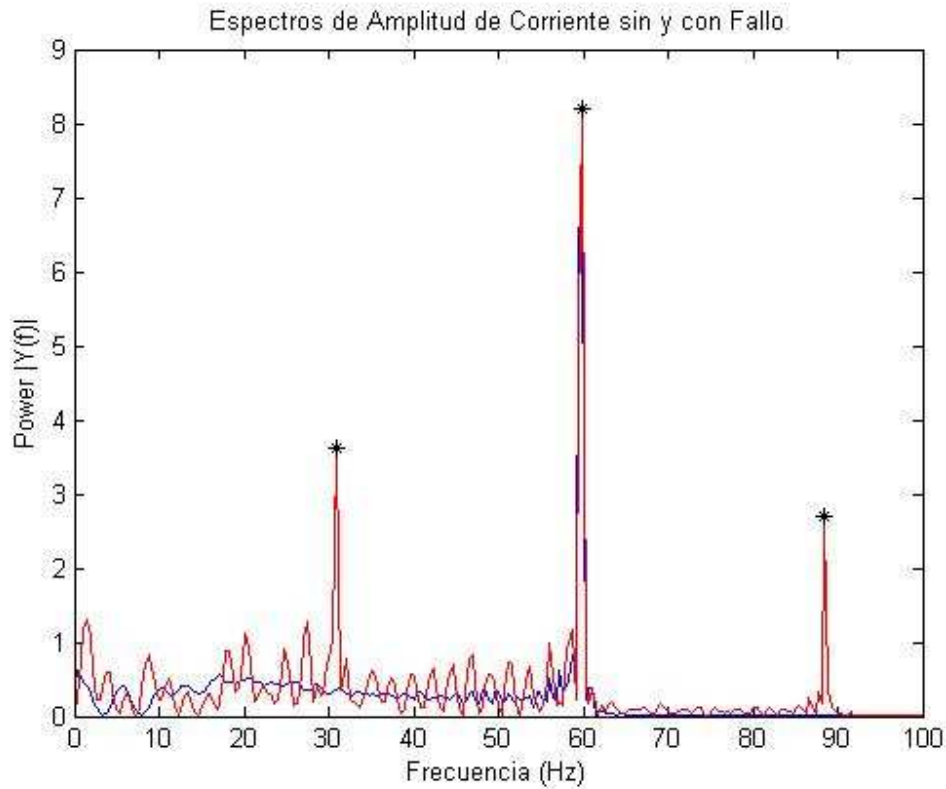


Figura 3.12. Análisis de corriente con y sin fallas realizada al motor añadiéndole la componente fundamental de fallo.

### 3.4 Interfaz GUI implementada.

Para ayudar a una mejor interpretación visual y hacer más amistoso el ambiente del programa se implementa una interfaz GUI. De esta manera se logra hacer una mayor recopilación de los conocimientos adquiridos durante el estudio de la carrera, especialmente de la asignatura Herramientas de Software.



Figura 3.13. Interfaz implementada para hacer más fácil la comprensión del programa.

### 3.5 Análisis económico.

El desarrollo del presente trabajo de investigación proporciona beneficios de manera directa a cualquier industria o centro de trabajo donde se empleen motores eléctricos de inducción, y al realizar un análisis económico se demuestra la importancia del mismo.

Asumiendo un período de desarrollo de la aplicación de cuatro meses de trabajo, igual a 16 semanas y 460 horas. Se asume además que el tutor dedica cuatro horas semanales, lo cual resulta en 64 horas efectivas. Se puede entonces elaborar una propuesta del presupuesto en gastos de salarios y materiales para el diseño del software, según se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Presupuesto aproximado en gastos de salarios y materiales

	Indicadores	Cantidad	Equivalente en pesos cubanos	Total (\$)
Desarrollo de la Aplicación	16 semanas de trabajo	640 horas		
Profesor		64 h	\$5/hora	320
Estudiante		640 h	\$100/mes	400
Medios Técnicos	Ordenador	1	\$650	650
<b>Total (\$)</b>				<b>1370</b>

Investigaciones como esta tienen un alto costo en la actualidad, dado que los motores de inducción tienen elevados precios en el mercado internacional. Con las técnicas de detección de fallos se logra detectar los mismos antes de causar una rotura total del motor y dejarlo en desuso interrumpiendo el proceso productivo. Las fallas se detectan en sus etapas iniciales por lo que se cuenta con suficiente tiempo para hacer la planeación y la programación de las acciones correctivas (mantenimiento correctivo) en paros programados y bajo condiciones controladas que minimicen los tiempos muertos y el efecto negativo sobre la producción y que además garanticen una mejor calidad de reparaciones.

### **3.6 Consideraciones parciales.**

El software implementado se presenta en una interfaz amigable y de fácil comprensión a la hora de realizar el análisis a un motor eléctrico de inducción determinado. Además tiene la opción de “análisis completo” donde se pueden hacer comparaciones de las diferentes magnitudes analizadas. Las gráficas obtenidas ofrecen resultados precisos acerca de las magnitudes analizadas corroborando la teoría anteriormente expuesta. En las mismas se pueden localizar los máximos y conocer la frecuencia característica de los mismos, de esta manera se puede identificar a qué tipo de falla pertenecen. Los análisis propuestos solo fueron realizados a motores virtuales.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

Como resultado final de esta investigación, se implementa en Matlab técnicas de detección de fallas en motores de inducción, específicamente, las basadas en procesamiento de señales. La validez de la propuesta se constata mediante simulación, con lo cual se corrobora que el software permite detectar fallas en motores eléctricos de inducción. A partir de estos resultados, se plantean las conclusiones generales siguientes:

- 1 La revisión bibliográfica de la literatura especializada arrojó como resultado la importancia de dominar los principales conceptos asociados al conocimiento de fallas en motores eléctricos de inducción; así como reconocer los principales métodos empleados en la detección de fallas. De manera especial se destacan los basados en procesamiento de señales porque constituyen la principal técnica que se utiliza actualmente para la detección y diagnóstico de fallos en las máquinas eléctricas rotativas, por su simplicidad y mejores resultados que otros análisis.
- 2 Las técnicas seleccionadas de detección y diagnóstico de fallos en las máquinas eléctricas permiten realizar el análisis en régimen permanente de la medida de la magnitud seleccionada, generalmente la corriente estática. Mediante el análisis de esta señal, se obtienen los diferentes parámetros que la caracterizan, identifican y permiten detectar el estado de la máquina.
- 3 Los algoritmos programados en Matlab para la detección de las fallas permiten la identificación de las mismas y conocer su naturaleza. Mediante la simulación, se constata que el software permite detectar fallas en motores eléctricos de inducción.

**Recomendaciones**

- 1 Implementar algoritmos que permitan el análisis de fallas mecánicas como son excentricidades, barras cortadas y rotura de engranajes.
- 2 Añadir al software un análisis de fallas de motores de corriente continua, ya que este solo analiza motores de corriente alterna.
- 3 Realizar los análisis propuestos a motores reales para validar la propuesta en la práctica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACOCELLA, E. C. & TIERRA, C. J. Problemas en la interpretación de la FFT. Jornadas de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (FIEE), 1995 Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.
- AYHAN, B., CHOW, M.-Y., TRUSSELL, H., SONG, M.-H., KANG, E.-S. & WOE, H.-J. Statistical analysis on a case study of load effect on PSD technique for induction motor broken rotor bar fault detection. *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, 2003. SDEMPED 2003. 4th IEEE International Symposium on, 2003. IEEE, 119-123.
- BAKHRI, S., ERTUGRUL, N., SOONG, W. & ARKAN, M. Investigation of negative sequence components for stator shorted turn detection in induction motors. *Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 2010 20th Australasian, 2010. IEEE, 1-6.
- BONETT, A. H. & SOUKUP, G. C. 1992. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28, 921-927.
- BOSSIO, G. R., DE ANGELO, C. H., DE PAULI, A. D. & GARCÍA, G. O. 2005. Diagnóstico de fallas en el rotor de motores de inducción caso de estudio: motor de 1.6 MW de bomba de alta presión. *XI Reunión de Trabajo en Procedimiento de la Información y Control*, 21.
- BOTHA, M. M. Electrical Machines Failure, Causes and Cures, *Electrical Machines and Drives*. 8va Conferencia anual de IEEE, 1-3 de Septiembre 1997. 114-117.
- BOUZID, M. & CHAMPENOIS, G. Accurate stator fault detection insensitive to the unbalanced voltage in induction motor. *Electrical Machines (ICEM)*, 2012 XXth International Conference on, 2012. IEEE, 1545-1551.
- CARVAJAL, F., RAMÍREZ, J. & ARCOS, L. 1999. Diagnóstico en línea y fuera de línea de motores de inducción de baja, mediana y alta tensión. *Boletín IIE*. Marzo, 90-96.
- CASTELLI LEMEZ, M. & ANDRADE, M. 2007. Metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos de inducción. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, 5, 65-76.
- COSTA, M. 2006. *Detector de fallas de motores eléctricos*. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional San Nicolas.

- ELAWGALI, S. Effect of combined eccentricities on the spectrum of induction machine currents. XL International Symposium on Electrical Machines, SME, 2004. 15-18.
- FERNÁNDEZ, M., GARCÍA, M., ORCAJO, G., CANO, J. & SOLARES, J. 1998. Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas. *Barcelona, Marcombo*, 121-153.
- FILIPPETTI, F., FRANCESCHINI, G. & TASSONI, C. A survey of neural network approach for induction machine on-line diagnosis. PEMC'96, 1996.
- GULDEMIR, H. 2003. Detection of airgap eccentricity using line current spectrum of induction motors. *Electric Power Systems Research*, 64, 109-117.
- HAIR, J. F. & SUÁREZ, M. G. 1999. *Análisis multivariante*, Prentice Hall Madrid.
- NANDI, S. & TOLIYAT, H. A. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines-a review. Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE, 1999. IEEE, 197-204.
- NANDI, S., TOLIYAT, H. A. & LI, X. 2005. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 20, 719-729.
- PADILLA, I. A. 2006. *Impacto de la Excentricidad Estática de la Estabilidad Transitoria de un Generador de Polos Salientes*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional.
- PUCHE, R. 2008. *Nuevos Métodos de Diagnóstico de Excentricidad y otras Asimetrías Rotóricas en Máquinas Eléctricas de Inducción a través del Análisis de la Corriente Estatórica*. Tesis Doctoral], Universidad Politécnica de Valencia, 2008.[Links].
- RILEY, C. M., LIN, B. K., HABETLER, T. G. & KLIMAN, G. B. 1999. Stator current harmonics and their causal vibrations: a preliminary investigation of sensorless vibration monitoring applications. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 35, 94-99.
- ROSERO GARCÍA, J. 2011. Detección de fallas en máquinas de inducción basada en STFT y Transformada Wavelet. *Visión Electrónica*, 38-65.
- SAN MARTÍN, C., ESTUPIÑÁN, E. & SAN MARTÍN, D. 2010. A methodology for the detection and diagnostic of localized faults in gears and rolling bearings systems. *INGENIARE-Revista Chilena de Ingeniería*, 18.
- SIN, M., SOONG, W. & ERTUGRUL, N. Induction machine on-line condition monitoring and fault diagnosis-a survey", Australasian Universities Power Engineering Conference. Zealand, 28 September, 2003. Citeseer.
- STEFANO, R., MEO, S. & SCARANO, M. Induction motor faults diagnostic via artificial neural network. ISIE 1994 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, May, 1994. 25-27.
- TALLAM, R., LEE, S., STONE, G., KLIMAN, G., YOO, J.-Y., HABETLER, T. & HARLEY, R. A survey of methods for detection of stator related faults in induction machines. *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, 2003. SDEMPED 2003. 4th IEEE International Symposium on, 2003. IEEE, 35-46.

- TAVNER, P., RAN, L. & PENMAN, J. 2008. *Condition monitoring of rotating electrical machines*, Institution of Engineering and Technology (IET).
- THOMSON, W. T. & FENGER, M. Case histories of current signature analysis to detect faults in induction motor drives. Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International, 2003. IEEE, 1459-1465.
- VILLADA, F. 2007. Diagnóstico de Fallas en Motores de Inducción mediante la Aplicación de Redes Neuronales Artificiales. *Información Tecnológica* N° 2 ed.
- WILLIAMSON, S. & SMITH, A. Steady-state analysis of 3-phase cage motors with rotor-bar and end-ring faults. IEE Proceedings B (Electric Power Applications), 1982. IET, 93-100.