



UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DEPARTAMENTO DE ELECTROENERGÉTICA

Trabajo de Diploma

Título de la Tesis: “Detección de rupturas en las barras de un motor de inducción
mediante pruebas no invasivas”

Autor: Yadian Amador Rojas

Tutor: M.Sc. Alberto Limonte Ruiz

Santa Clara, Cuba, 2017



UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE ELECTROENERGÉTICA

Trabajo de Diploma

Título de la Tesis: “Detección de rupturas en las barras de un motor de inducción
mediante pruebas no invasivas”

Autor: Yadian Amador Rojas

Email: yamador@uclv.cu

Tutor: M.Sc. Alberto Limonte Ruiz

Email: limonte@uclv.edu.cu

Santa Clara, Cuba, 2017



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de
Departamento donde se
defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

*La juventud y la ciencia son similares,
con el paso del tiempo avanzan
y se apoderan de la verdad.
A. Einstein.*

DEDICATORIA

A quienes no tienen nada y todo lo dan,

A quienes verán al fin su sueño convertido en realidad.

A mis padres especialmente a mi madre y a mi familia en general por haberme convertido en hombre de bien.

A la Revolución y a nuestro comandante por haberme permitido estudiar una carrera universitaria.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por servirme de guía y ejemplo en el camino de la vida.

A mi tutor por su apoyo incondicional en la confección de este proyecto.

A los profesores que contribuyeron en mi formación profesional.

A mi novia por haberme apoyado en mi último y en mi tesis.

A mis amistades por compartir la vida universitaria.

A todos aquellos que de una forma u otra me han ayudado en todo este período.

TAREAS TÉCNICAS

1. Búsqueda y análisis de la información bibliográfica relacionada con los métodos para el diagnóstico de rupturas en barras de motores de inducción.
2. Selección de las variables a medir así como los métodos y medios a emplear en su medición.
3. Implementación de las mediciones.
4. Desarrollo de las herramientas para el análisis de los resultados de las mediciones.
5. Validación de los resultados obtenidos mediante comparación con resultados experimentales o publicados disponibles en la literatura.
6. Escritura del trabajo.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

Los motores de inducción son denominados los “caballos de batalla” de la industria moderna. También han alcanzado un lugar prominente en los servicios y los hogares. Estudios realizados por la EPRI (*Electric Power Research Institute*) muestran los porcentajes de fallas para un amplio rango de motores de inducción, con un 37% de fallas presentes en el devanado del estator, un 41% en cojinetes y rodamientos, un 12% de fallas diversas y un 10% de fallas en el rotor. Respecto a esta última avería es importante señalar que aunque tiene un escaso porcentaje de incidencia, es una falla grave ya que sus consecuencias para la integridad global de la máquina suelen ser catastróficas.

Los métodos de diagnóstico de dichas fallas pueden clasificarse en invasivos y no invasivos, resultando estos importantes por su impacto en la continuidad del servicio de dichos motores. En el presente trabajo se aborda uno de estos métodos, el conocido como MCSA (análisis de la forma de la señal de la corriente) para la detección de roturas en las barras del rotor. Este método es implementado y queda demostrada su eficacia para el análisis de este tipo de fallas mediante su aplicación a un motor trifásico de inducción.

Palabras Claves: Roturas en barras, diagnóstico, MCSA, motores de inducción

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1.Métodos para la detección de fallas en motores de inducción.	4
Introducción.....	4
1.1 Fallas eléctricas	4
1.1.1 Fallas en el devanado del estator.....	4
1.1.2 Fallas en el rotor (<i>Rotura de barras y anillos de cortocircuito</i>).....	5
1.1.3 Fallas externas	7
1.2 Fallas mecánicas	8
1.2.1 Desequilibrio.....	8
1.2.2 Desalineación	9
1.2.3 Fallas en cojinetes.....	10
1.2.4 Fallas en engranajes	11
1.2.5 Excentricidad en el entrehierro	13
1.3 Tipos de métodos para la detección	18
1.3.1 Métodos invasivos	18
1.3.2 Métodos no invasivos	18
1.3.2.1 Corrientes de fuga.....	19
1.3.2.2 Corriente de secuencia negativa	19
1.3.2.3 Tensión de secuencia cero.....	20
1.3.2.4 Matriz de impedancia de secuencia	20
1.3.2.5 Análisis de la forma de la señal de la corriente (MCSA).....	20
1.3.2.6 Vector complejo de Park (CPV).....	21

1.3.2.7	Análisis armónico del torque y la potencia (THA)	23
1.3.2.8	Redes Neuronales (ANN)	25
	Conclusiones parciales	26
	CAPÍTULO 2. Materiales y métodos	27
	Introducción.....	27
2.1	Instrumentación	27
2.1	Procesamiento de los datos.....	30
2.1.1	La transformada rápida de Fourier (propiedades y limitaciones).....	30
2.1.2	Solapamiento. Efecto “Aliasing”.....	31
2.1.3	Ventanas (“Windows”).	33
2.1.4	Adición de ceros a la señal (“Zero- Padding”).....	35
	CAPÍTULO 3. Análisis de los resultados obtenidos.....	38
	Introducción.....	38
3.1.	Consideraciones sobre el espectro de frecuencia y su relación con el tipo de defecto presente en las barras del rotor de un motor de inducción.....	38
3.2.	Aplicación de la FFT	40
3.3.	Aplicación de espectro de potencias mediante periodograma de Welch.....	41
	CONCLUSIONES.....	44
	RECOMENDACIONES	45
	BIBLIOGRAFÍA	46
	ANEXOS	52

INTRODUCCIÓN

El primer motor eléctrico, que usaba electroimanes y que rotaba, fue demostrado por Ányos Jedlik en 1828. Este desarrolló más adelante un motor de gran alcance para propulsar un vehículo. En 1832, el científico británico Esturión de Guillermo inventó el motor eléctrico continuo capaz de un uso práctico. El motor moderno de la C.C. fue inventado por accidente en 1873 a manos de Gramo de Zénobe. La máquina del gramo, así conocida, era el primer motor eléctrico que era acertado para la industria. El practicable motor de CA fue inventado en 1888 por Nikola Tesla además del sistema polifásico de la transmisión de energía [1].

Las máquinas de inducción (MI) pueden ser según su número de fases: monofásica, bifásica o trifásica estas máquinas pueden ser encontradas lo mismo en el sector residencial, los servicios, y en la industria debido a sus grandes ventajas en comparación con las sincrónicas y las de corriente directa: La alimentación eléctrica se hace a través de las líneas trifásicas que alimenta el devanado, no presenta elementos rozantes, tiene menor costo de manufactura y mantenimiento, no tiene problemas ante variaciones de la carga.

Las desventajas que presentan estas máquinas son: Demandan altas corrientes en el encendido por lo que requieren de métodos de arranque que incluyen un costo adicional para reducir estas corrientes y evitar caídas de tensión, posee métodos de control de velocidad pero son costosos.

Estudios realizados por el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica EPRI (*Electric Power Research Institute*) muestran los porcentajes de falla para un amplio rango de motores de inducción, el 37% de fallas en los motores fueron causadas en el devanado del estator, el 41% por fallas en los cojinetes y rodamientos, el 12% a fallas diversas y el 10% por fallas en el rotor [2]. Respecto a esta última avería es importante señalar que aunque tenga un escaso porcentaje de incidencia, es una

falla grave ya que sus consecuencias para la integridad global de la máquina suelen ser catastróficas [3].

Problema científico:

La necesidad de profundizar en el estudio de métodos para detectar rupturas en las barras de un motor asincrónico trifásico de inducción en operación mediante mediciones de parámetros y análisis de dichas mediciones.

Objeto de estudio:

Los métodos y los procedimientos para obtener y realizar el procesamiento digital de señales de corrientes del estator en motores de inducción sometidos a ensayos para detectar roturas en las barras del rotor.

Campo de Acción:

Experimentación y diagnóstico de fallas en motores de inducción.

Objetivo general:

Implementar métodos que permitan la evaluación de la presencia o no de rupturas de barras en motores de inducción de jaula de ardilla, así como cuantificar la cantidad de barras rotas.

Objetivos específicos:

1. Establecer el marco teórico-conceptual sobre los métodos para la detección de rupturas de barras en motores de inducción de jaula de ardilla.
2. Identificar las variables a medir y el esquema de medición de las mismas.
3. Implementar las herramientas de software necesarias para el análisis de los resultados de las mediciones.
4. Evaluar los resultados obtenidos mediante experimentación o comparación con resultados publicados disponibles.

Hipótesis:

Es posible implementar métodos que; mediante mediciones y análisis de los resultados de las mismas, permitan predecir la presencia o no de barras rotas en el

rotor de un motor de inducción, lo que contribuirá a la disminución de los costos por roturas y afectaciones a la producción y los servicios, así como organizar el mantenimiento preventivo de dichos tipos de máquinas eléctricas.

Los **métodos de investigación** fundamentales que se emplearán serán:

Métodos del nivel teórico:

Método histórico lógico, para el establecimiento del estado actual del conocimiento sobre los métodos para detectar la ruptura de las barras de los motores asincrónicos trifásicos y los métodos para el procesamiento digital de las señales obtenidas de pruebas realizadas a los mismos, con vistas a la identificación de algunos de los parámetros del comportamiento de la máquina con fallas, como son la corriente por el estator, la velocidad y los espectros de frecuencia. Se realiza un análisis histórico de la temática y se determina cuáles han sido las tendencias; se definen los conceptos claves sobre estas temáticas así como se elabora una síntesis de las principales concepciones al respecto, identificando los aspectos positivos y realizando análisis críticos de las deficiencias.

Métodos del nivel empírico

Se utiliza como método experimental el estudio de casos de rupturas en barras de motores de inducción.

Métodos del nivel matemático-estadístico

El análisis numérico (transformada rápida de Fourier) de las señales obtenidas de las corrientes por el estator.

El trabajo está estructurado en tres capítulos: en el capítulo primero se presenta el marco teórico conceptual sobre las fallas que presentan los motores de inducción y los métodos para la detección de dichas fallas, se profundiza en la falla correspondiente a la ruptura de barras, en el capítulo segundo se presentan los materiales y métodos para la realización de la presente investigación y en el capítulo tercero se realiza un análisis de los resultados obtenidos mediante la comparación con datos publicados por otros autores.

CAPÍTULO 1. Métodos para la detección de fallas en motores de inducción.

Introducción

El correcto funcionamiento de los motores de inducción se ve limitado por la presencia de las denominadas fallas. Estas fallas pueden ser de origen eléctrico o de origen mecánico.

1.1 Fallas eléctricas

1.1.1 Fallas en el devanado del estator

A continuación se enumeran las diferentes fallas posibles [4]:

- 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.
- 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.
- Fallas en el aislamiento.

Estas fallas en el estator o en los aislamientos del estator producen [5]:

- Altas temperaturas de las bobinas, o del núcleo del estator.
- Láminas flojas del núcleo del estator, juntas en mal estado, etc.
- Pérdida de abrazadera en los anillos de cortocircuito.
- Contaminación debido al aceite, humedad y suciedad.
- Descargas eléctricas y desbalances en el suministro.
- Fugas en los sistemas de refrigeración.

El estudio de las espiras cortocircuitadas en el análisis circuital está basado en la detección de las componentes en frecuencia dadas por la siguiente ecuación [5]:

$$f_s = \left(k \pm n \cdot \frac{1-s}{p} \right) \cdot f \quad (1.1)$$

Dónde “f” es la frecuencia de alimentación, “p” es el número de pares de polos, “s” es el deslizamiento y “k” y “n” son constantes, de tal forma que n=1, 2, 3,.. y k=1, 3, 5,....

1.1.2 Fallas en el rotor (*Rotura de barras y anillos de cortocircuito*)

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. Actualmente en la fabricación de grandes máquinas eléctricas se insertan las barras dentro de las ranuras del paquete magnético haciéndolas encajar fuertemente sin utilizar ningún material aislante entre las barras y los bordes de las chapas magnéticas. 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.

Estas corrientes fueron denominadas por Kerszenbaum y Landy como “corrientes inter-barras”, [6], [7]. Estas corrientes se observan para analizar el comportamiento de la falla, y resulta evidente pensar que estas corrientes diferirán entre máquina sana y la que presente dicha falla. 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 contruidos 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 [5]:

- 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, fallas 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 [8].

Para un motor trifásico asíncrono de p pares de polos cuya velocidad sincrónica N_s se cumple que la frecuencia de alimentación de las bobinas del estator es:

$$f_1 = \frac{N_s \cdot p}{120} \quad (1.2)$$

Sí la simetría del rotor es perfecta entonces solo existe un campo magnético giratorio sincrónico. Definiendo el deslizamiento del rotor como:

$$s = \frac{N_s - N_R}{N_s} \quad (1.3)$$

Dónde N_R es la velocidad del rotor. Entonces la frecuencia de la corriente del rotor es:

$$f_2 = f_1 \cdot s \quad (1.4)$$

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

$$N_R + N_2 = N_R + N_s - N_R = N_s \quad (1.5)$$

Por tanto, la rotura de barras genera una asimetría en el diseño, lo cual produce un campo magnético rotativo de sentido contrario al giro del rotor tal y como se ha dicho anteriormente:

$$N_s - N_R = s \cdot N_s \quad (1.6)$$

Si se situase un observador en el estator, este observaría un campo magnético rotativo hacia atrás N_B y hacia delante producido por la barra rota.

Es evidente que es un campo pulsante, descomponiéndose en dos campos giratorios, el que va hacia delante y el que va hacia atrás ambos girarán a una determinada velocidad. Por lo tanto el que va hacia delante no se apreciará en el análisis de frecuencias ya que su velocidad coincide con la del campo del estator:

$$N'_B = N_R + s \cdot N_s = N_s \quad (1.7)$$

Mientras que el que va hacia atrás:

$$N_B = N_R - s \cdot N_s = N_s - 2 \cdot s \cdot N_s \quad (1.8)$$

Si lo expresamos en términos de frecuencias:

$$f_B = (N_s - 2 \cdot s \cdot N_s) \cdot p = \left(\frac{f_1}{p} - 2 \cdot s \cdot \frac{f_1}{p} \right) \cdot p = f_1 \cdot (1 - 2 \cdot s) \quad (1.9)$$

Por tanto, las oscilaciones producidas por barras rotas aparecen a la siguiente frecuencia que se muestra [9]:

$$f_B = |f_1 \cdot (1 \pm 2 \cdot s)| \quad (1.10)$$

1.1.3 Fallas externas

- Debido a componentes electrónicos del sistema de alimentación o regulación de la máquina eléctrica.

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 fallas a la máquina eléctrica y deberán ser tenidos en cuenta a la hora de realizar un estudio de diagnóstico y detección de fallas de la máquina eléctrica [4].

➤ Efectos de la carga

Si el Par (momento) 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 senoidales, 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 que respondan a la siguiente ecuación:

$$f_{carga} = f_s \pm m \cdot f_r = f_s \cdot \left[1 \pm m \cdot \frac{1-s}{p} \right] \quad (1.11)$$

Dónde $m = 1, 2, 3, \dots$ Siendo habitual que en sistemas donde el par de la carga varía en el tiempo, estas frecuencias enmascaren otros tipos de fallas, resultando así difícil discernir si la frecuencia característica es debida a una posible falla, 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 [10].

1.2 Fallas mecánicas

1.2.1 Desequilibrio

Un sistema mecánico giratorio está en equilibrio si la resultante de todas las fuerzas, tanto internas como externas, y sus respectivos pares son de magnitud, dirección y sentido constante [4].

Una vez fijadas la constancia en módulo, sentido y dirección de las fuerzas, gracias a una distribución homogénea de las masas, se fija la máquina mediante anclajes que opongan una fuerza a la resultante del sistema [4].

Debido a esta definición se pueden observar dos tipos de desequilibrios:

- *Estático*: producido por una distribución no homogénea de masa, detectable con el rotor parado. Si un rotor posee un desequilibrio estático, al apoyar sus dos extremos sobre los cojinetes, se desplazará hasta quedar la parte más pesada en la posición más baja.
- *Dinámico*: asociado al propio movimiento. Si un rotor posee una distribución longitudinal de pesos incorrecta se produce la intersección de los ejes de rotación y principal de inercia en un solo punto.

1.2.2 Desalineación

De la misma manera que es imposible fabricar un rotor, el cual esté totalmente equilibrado, lo es también el conseguir alinear perfectamente el eje del motor y el de la máquina acoplada en todos los planos. El acoplamiento entre ambas se realiza a través de un sistema rígido o flexible, en ambas se debe conseguir que los ejes de ambas máquinas sean perfectamente colineales. Si esto no ocurre aparece una fuerza resultante sobre el acoplamiento, en caso de conseguir dicho acoplamiento perfecto la fuerza resultante sería nula [4].

Si el acoplamiento no es perfecto tal y como ocurre en la Figura 1.1, extraída del libro “Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas”, se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$F = \frac{E \cdot I}{a} \cdot \operatorname{tg}(\beta) \quad (1.12)$$

Dónde “E”, “I” son parámetros constructivos del rotor, y “a” depende geométricamente de “a1” y “a2”. La existencia de esta fuerza resultante provocará la aparición de vibraciones de amplitud proporcional a ella, estando relacionada con la velocidad de giro de la máquina. Suele aparecer en los armónicos múltiplos de esta frecuencia sobre todo en el segundo [11].

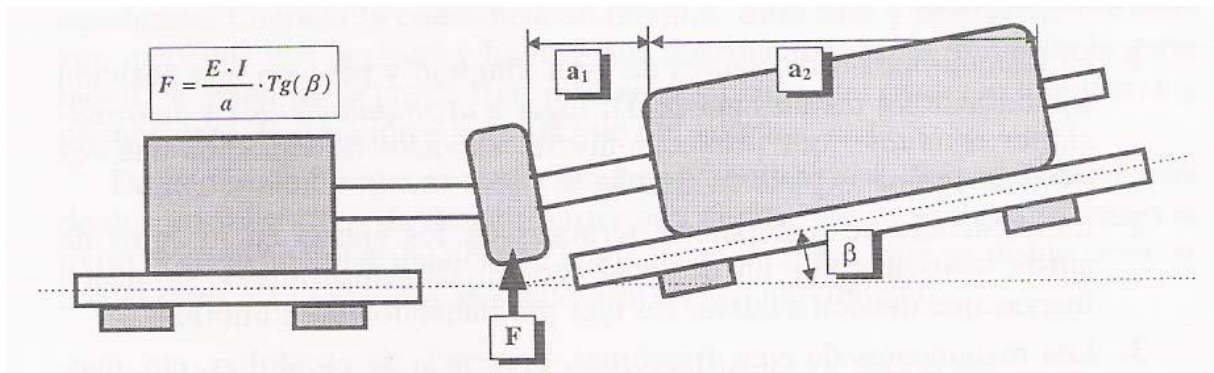


Figura 1.1 Fuerza resultante de la desalineación de los ejes.

Es uno de los problemas más frecuentes de las máquinas rotativas, ya que la presencia de holguras, procesos térmicos y dinámicos en los rotores, desgastes, fuerzas externas provocan la deformación del rotor y su desplazamiento favoreciendo así la desalineación. Pero industrialmente hay técnicas para corregir la perfecta alineación de los ejes, mediante relojes de alineación, o inclusive hasta el uso de láser para lograr una alineación perfecta.

La relación del efecto de las desalineaciones del eje con la máquina eléctrica rotativa está en función de la frecuencia natural de la misma y de la estructura que la compone. Existe una relación de proporcionalidad entre la amplitud de las vibraciones y el nivel de la falla alcanzado, inclusive si fuese capaz de excitar la vibración en algún elemento constitutivo de la máquina cercano a la de resonancia, podría ser destructivo [4].

1.2.3 Fallas en cojinetes

Todas las máquinas eléctricas rotativas disponen de cojinetes sobre los que se apoyan los extremos del eje que sustenta la parte móvil, ya que estos elementos están sometidos a una continua fricción y movimiento, cualquier vibración producida por un pequeño defecto de la máquina o por una agente externo se les transmite directamente provocando que sea el elemento con mayor tasa de fallas [4].

Por ello, se han desarrollado diversas técnicas de diagnóstico del estado de los cojinetes con una precisión y eficacia considerable. Entre ellas destaca el análisis de las vibraciones.

Un cojinete de elementos rodantes (análogo al de rodillos), posee unas tolerancias extremadamente pequeñas que no permiten un movimiento significativo del eje con respecto al propio cojinete. Todos los esfuerzos desde el eje son transmitidos a través de los elementos rodantes hacia el anillo exterior del cojinete y de allí a su alojamiento. Se generan unas frecuencias específicas de vibración basadas en la geometría del cojinete, número de elementos rodantes, velocidad de giro del eje, apareciendo incluso cuando el cojinete está en perfecto estado pero de magnitud no muy significativa.

Mediante el estudio de las frecuencias es posible determinar cuando se hace necesaria la sustitución del cojinete, así como cuál es la parte del cojinete que ha fallado [12].

Así pues la frecuencia característica que se produce en los cojinetes cuando la falla es producida externamente o internamente es la siguiente:

$$f_v[Hz] = \left(\frac{N}{2}\right) \cdot f_r \cdot \left[1 \pm \frac{b_d \cdot \cos \beta}{d_p}\right] \quad (1.13)$$

Mientras que la frecuencia característica que se produce en los cojinetes cuando existe una falla en los rodamientos es la siguiente:

$$f_v[Hz] = \left(\frac{d_p \cdot f_r}{2 \cdot b_b}\right) \cdot f_r \cdot \left[1 - \left(\frac{b_d \cdot \cos \beta}{d_p}\right)^2\right] \quad (1.14)$$

Para concluir sí la falla se produce en el tren de engranajes la frecuencia característica es la siguiente:

$$f_v[Hz] = \left(\frac{f_r}{2}\right) \cdot f_r \cdot \left[1 - \left(\frac{b_d \cdot \cos \beta}{d_p}\right)\right] \quad (1.15)$$

1.2.4 Fallas en engranajes

El uso de los engranajes se debe a la elevada velocidad de giro de las máquinas eléctricas rotativas, y la necesidad de diferentes velocidades de giro y pares según el tipo del proceso al cual se adecue la máquina eléctrica, es por ello en infinidad de aplicaciones el uso de trenes de engranajes entre la máquina a accionar y la máquina motriz [4].

Los trenes de engranaje pueden estar constituidos de diferentes formas: por 2 piñones, un piñón y un conjunto de engranajes, o varios conjuntos formando una estructura más compleja.

Estos engranajes, elementos externos a la máquina eléctrica rotativa, influirán sobre esta, de manera que es importante conocer sus efectos no sólo desde el punto de vista del mantenimiento, sino de la misma forma que para la detección de la falla de los cojinetes, se usa el análisis de las vibraciones a ciertas frecuencias, que se sabe que son características según el tipo de engranaje, como por ejemplo frecuencia de giro del engranaje, frecuencia de giro del piñón, frecuencia de paso de ensamblaje, etc.

El caso más simple es un tren de engranajes simple, constituido por un sólo piñón y una rueda dentada, se deducen a continuación una serie de frecuencias propias del engranaje como:

- Frecuencia de giro del engranaje: no es más que la velocidad de giro de la rueda dentada de salida del engranaje expresada en hercios tal y como se representa en la siguiente ecuación, dónde R_g es la velocidad de la rueda dentada:

$$f_{rg} = \frac{R_g}{60} \quad (1.16)$$

- Frecuencia de giro del piñón, análoga a la anterior, dónde R_p es la velocidad del piñón en revoluciones por minuto:

$$f_{rp} = \frac{R_p}{60} \quad (1.17)$$

- Frecuencia de engranaje, la frecuencia a la cual engranan la rueda dentada y el piñón, dónde N_g es el número de dientes de la rueda dentada y N_p es el número de dientes del piñón:

$$f_m = f_{rp} \times N_p = f_{rg} \times N_g \quad (1.18)$$

- Frecuencia de paso de ensamblaje entre la rueda dentada y el piñón. De la cual se puede extraer que en caso de defecto de alguno de los dientes en ambos engranajes aparecerá una frecuencia de vibración como la que se muestra en la

siguiente ecuación, dónde N_a se define como el producto de los factores primos comunes del número de dientes del piñón y de la corona.

$$f_a = \frac{f_m}{N_a} \quad (1.19)$$

- Frecuencia de repetición de diente, si existiera algún defecto en ambos elementos simultáneamente, es decir en el piñón y la rueda dentada, cuando coincidan se producirá un máximo de vibración, que responde a la siguiente ecuación matemática:

$$f_{tr} = \frac{N_a \cdot f_m}{N_p \cdot N_g} \quad (1.20)$$

1.2.5 Excentricidad en el entrehierro

Las excentricidades en las máquinas eléctricas engloban varios tipos de fallas provocados por no estar perfectamente alineados los centros de rotor y estator, también cuando uno de los dos elementos constitutivos, estator o rotor, no presenta una perfecta redondez [4].

Se suele denominar que una máquina eléctrica rotativa no tiene un entrehierro uniforme, si la distancia entre cualquier punto del rotor al estator no es la misma, ya sea al girar o en parado.

Por norma general, la inmensa mayoría de las máquinas eléctricas de pequeña-mediana potencia que se están fabricando a día de hoy, poseen un entrehierro de tamaño muy reducido, normalmente inferior a un milímetro. Haciéndose de vital importancia conseguir una perfecta alineación de los centros de rotor y estator.

Además se debe verificar la perfecta redondez, y la exactitud de sus posiciones relativas durante el giro. Cualquiera de estas causas anteriores provocará una deformación en el rotor, comúnmente denominada como una excentricidad.

La excentricidad en el entrehierro es la segunda causa de fallas en el rotor, después de la rotura de barras y agrietamiento de los anillos de cortocircuito.

Además hay que añadir que efectos tan naturales y corrientes como el desgaste de los cojinetes, la presencia elevada de vibraciones ya sea por la propia excentricidad

o por otras causas, provocan un incremento en las posibilidades de que el entrehierro deformado produzca daños tanto en rotor como estator. Por ejemplo, produciendo desgastes en los núcleos magnéticos de rotor, estator o ambos.

La falla de la excentricidad se clasifica en cuatro casos: como son excentricidad estática, dinámica, mixta y axial.

Pero realmente existen dos tipos de excentricidad, estática y dinámica, los otros dos son combinación de ambas. A continuación se explican detalladamente los diferentes tipos de excentricidad en las máquinas eléctricas.

➤ **Excentricidad estática**

La excentricidad estática consiste en una distorsión del tamaño del entrehierro en la cual el valor mínimo de este se encuentra en una posición fija del espacio. Esta distorsión puede ser causada por:

- Ovalidad del alojamiento estatórico.
- Incorrecto posicionamiento del rotor dentro del estator, causado por:
 - Cojinetes desgastados.
 - Mal apoyo en cojinetes.
 - Malformación de los alojamientos.
 - Excesiva tolerancia.
 - Etc.

En la Figura 1.2 se ilustran dos de las posibles causas de la excentricidad estática como es la ovalidad del estator por una mala construcción o el incorrecto posicionamiento del rotor dentro del alojamiento estatórico.

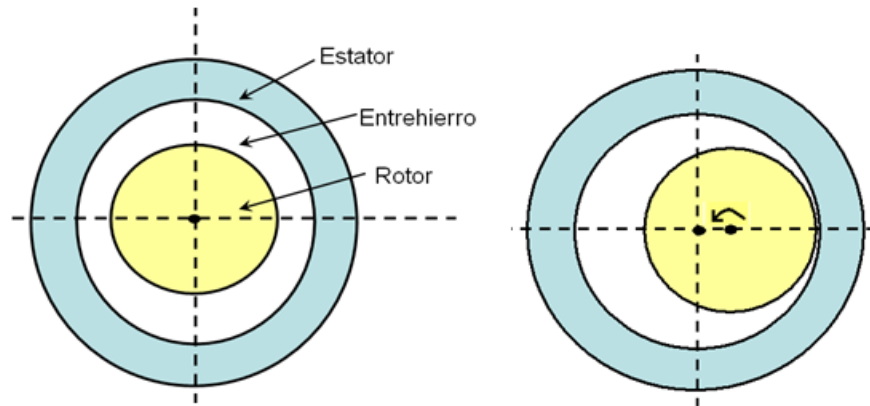


Figura 1.2 Dibujo de la excentricidad estática producida por (a) Estator ovalado (b) incorrecto posicionamiento del rotor [4].

Cabe decir, que es muy frecuente encontrarse excentricidad estática por combinación de las anteriores causas, y en menor medida suele aparecer la excentricidad estática sólo por una única causa de las anteriores.

A través de los bocetos de la máquina que se muestran en la Figura 1.3 se clarifica la trayectoria que realiza el rotor de una máquina eléctrica rotativa cuando gira, en la figura a modo de secuencia en fotogramas, con una excentricidad estática. En la Figura 1.3 se ha exagerado el entrehierro, ya que en máquinas reales de potencia baja o media en general suele ser inferior a un milímetro de ancho. Además se le ha añadido al rotor una muesca para observarla durante el movimiento o giro del rotor, según va cambiando la posición del mismo.

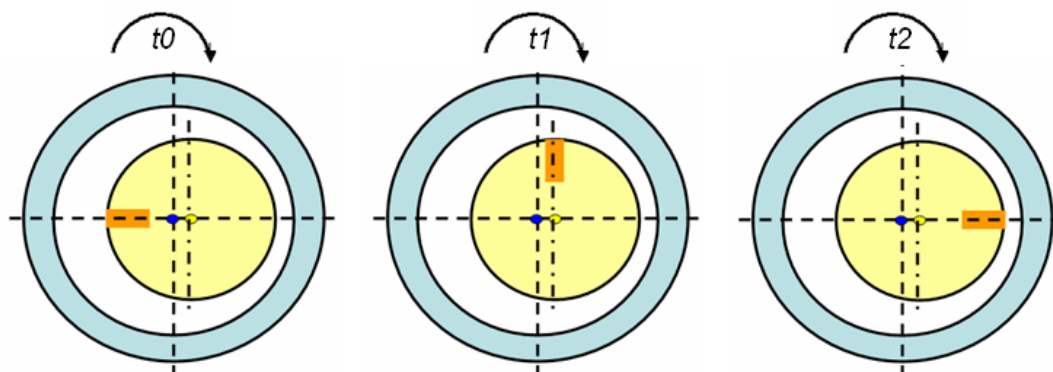


Figura 1.3 Representación de la trayectoria descrita por una máquina eléctrica rotativa con excentricidad estática [4].

Como se ve el centro del rotor esta desplazado exageradamente a la derecha con respecto al centro del estator, por tanto siempre queda fijo en el espacio el punto de mínima longitud de entrehierro [13], [14].

La frecuencia característica de la excentricidad estática es función del número de ranuras de la máquina eléctrica “N”, del deslizamiento “s”, del número de polos “p” y de la frecuencia de alimentación de la máquina eléctrica “f”.

$$f_{estática} = \left[\left((k \cdot N) \cdot \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm v \right) \right] \cdot f \quad (1.21)$$

Dónde “k” es una constante entera positiva o cero, y “v” es el orden de armónicos de alimentación que se desea tener en cuenta.

Excentricidad dinámica

Cuando se produce la excentricidad dinámica, el punto mínimo (la distancia mínima entre rotor y estator) no permanece fijo en una posición, tal y como ocurría en la excentricidad estática, si no que va girando de forma solidaria con el rotor. Esta falla puede ser causado por:

- Ovalidad del rotor.
- El centro de giro del rotor no sea el centro geométrico de rotación, causado por:
 - ✓ Cojinetes desgastados.
 - ✓ Flexión del eje.
 - ✓ Malformaciones en el paquete magnético del rotor.
 - ✓ Etc.

En la Figura 1.4 se representan unos bocetos de dos de las causas de la excentricidad dinámica como son el rotor ovalado y que el eje de giro del rotor no coincide con su centro de masas.

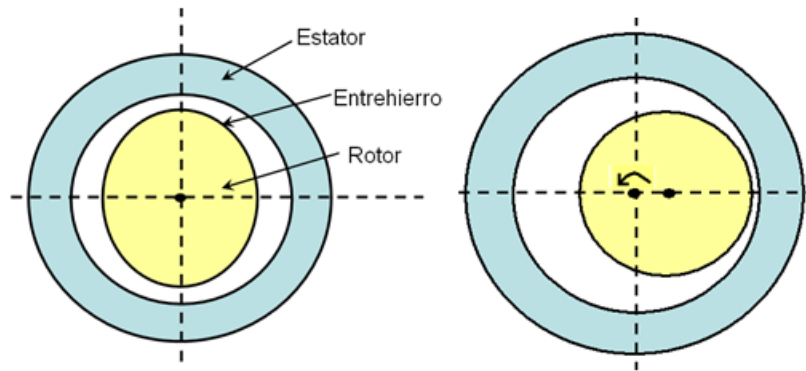


Figura 1.4 Representación de la excentricidad dinámica producida por (a) Rotor ligeramente ovalado (b) Eje de giro del rotor no coincide con su centro de masas [4].

En los diferentes bocetos de la máquina eléctrica que se muestran en la Figura 1.5 se describe la trayectoria de giro del rotor de la máquina eléctrica cuando posee una excentricidad dinámica. De forma análoga a la representación de la Figura 1.3, se ha exagerado el entrehierro para poder visualizar adecuadamente. Añadiéndole también al rotor una muesca para poder observarla durante el movimiento de giro del rotor según varía su posición en el espacio [13], [15].

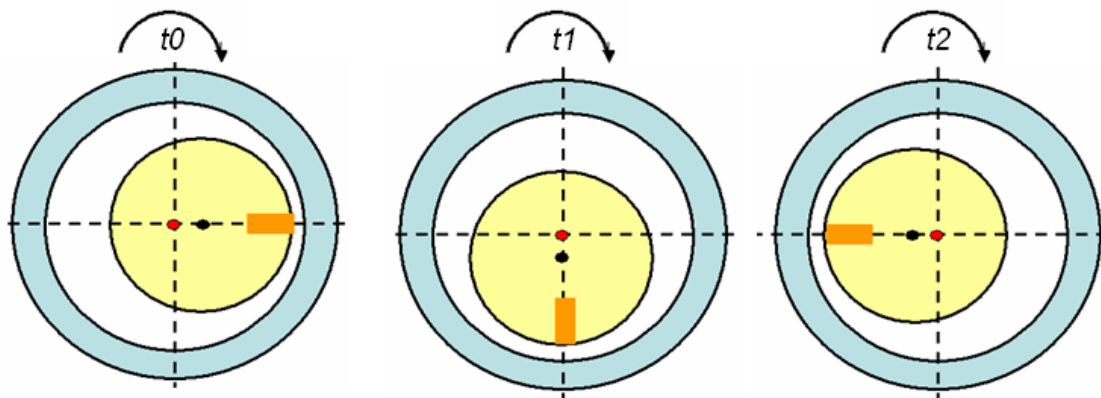


Figura 1.5 Representación de la trayectoria descrita por una máquina eléctrica rotativa con excentricidad dinámica [4].

Fijándose en la representación de la máquina eléctrica, el rotor gira frente al eje de giro del estator, mientras que el centro de masas del rotor no coincide con su eje de

giro, ya que es el eje de giro del estator, por tanto el punto de mínima longitud de entrehierro se desplaza en espacio y tiempo en función del giro del rotor.

De forma análoga a la excentricidad estática se obtiene la frecuencia característica de la excentricidad dinámica que también es función del número de ranuras “N”, del deslizamiento “s” y del número de polos “p” de la máquina eléctrica.

$$f_{dinámica} = \left[\left((k \cdot N \pm n_d) \cdot \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm v \right) \right] \cdot f \quad (1.22)$$

Además incorpora la variable “n_d” que siempre debe ser un entero positivo, de tal forma que la frecuencia característica se puede repetir a lo largo del eje x de las frecuencias ya que se han creado familias de frecuencia características repetitivas.

Para la detección de dichas fallas las máquinas de inducción poseen varios métodos de detección; los cuales se pueden clasificar en: invasivos y no invasivos.

1.3 Tipos de métodos para la detección

1.3.1 Métodos invasivos

Implican siempre la intervención sobre el motor, de forma tal que es necesario sacarlo de su posición en la cadena de producción o de servicios, llegando incluso a su desarme para poder colocar sensores o realizar inspecciones del estado de sus partes componentes, el equipamiento necesario para estos métodos son relativamente más baratos que los utilizados en los no invasivos también, dentro de estos se destacan: (Monitoreo de temperatura, monitoreo de condiciones y etiquetas de compuestos, impedancia de alta frecuencia/capacitancia entre vuelta-vuelta, fugas de flujo axial (AF), análisis de la señal de vibración, descarga parcial en línea (PD), ozono) [16].

1.3.2 Métodos no invasivos

Estos métodos no implican afectar la función del motor en el sitio en que esté, sino que mediante mediciones de parámetros del mismo, dígame corrientes, tensiones, y otros, fundamentalmente en el estator, se puede diagnosticar la presencia de fallas

incipientes o ya en un mayor grado de desarrollo el problema que presenta estos métodos son que la instrumentación es muy costosa. Dentro de estos se destacan los siguientes: (Corrientes de fugas, corrientes de secuencia negativa, tensión de secuencia cero, matriz de impedancia de secuencia, análisis de la forma de la señal de la corriente (MCSA), vector complejo de Park (CPV), par y potencia (THA), redes neuronales (ANN)) [16].

El objetivo principal de este trabajo está en los métodos no invasivos, por las ventajas que arriba se señalan y a continuación se profundiza en los mismos.

1.3.2.1 Corrientes de fuga

Es un método de monitoreo no invasivo basado en la medición de las corrientes diferenciales de fuga en los terminales [17]. Se desarrolla un modelo de sistema de aislamiento simple, que permite el cálculo de una capacitancia equivalente entre fase-tierra y fase-fase, así como el factor de disipación. La medición continua y la determinación de esos valores permite extraer conclusiones acerca de la condición del sistema general de aislamiento, así como su comportamiento en el tiempo. Un aumento o una disminución de la capacitancia y el factor de disipación es capaz de proporcionar una idea de la causa del deterioro. A pesar de que este método es capaz de detectar cambios en el sistema de aislamiento de fase-tierra y fase-fase no indica un deterioro del aislamiento entre vuelta-vuelta [16].

1.3.2.2 Corriente de secuencia negativa

Existen varios métodos que utilizan corriente de secuencia negativa para detección de fallas [17], [18], [19], [5], [20]. Si existe una asimetría producida por una falla entre vuelta-vuelta la componente de secuencia negativa va a cambiar y puede ser utilizado como un indicador de una falla. El principal problema con este método es que no sólo una falla entre vuelta-vuelta contribuye a los componentes de secuencia negativa, sino que también desequilibrios de tensiones, el propio diseño de la máquina, y errores de medición tienen un efecto en esta cantidad.

1.3.2.3 Tensión de secuencia cero

Un método que utiliza la tensión de secuencia cero es propuesto en [21]. La suma algebraica de las tensiones de línea a neutro se utiliza como un indicador de falla. Idealmente, la suma debe ser cero. La sensibilidad se mejora mediante el filtrado de la suma de tensión para deshacerse de los armónicos de orden superior. Este método no se ve afectado por desequilibrios en el suministro de la red de alimentación o de la carga. La principal desventaja de este procedimiento es que el neutro de la máquina debe estar accesible [16].

1.3.2.4 Matriz de impedancia de secuencia

El cálculo de la impedancia de secuencia negativa en condiciones de operación normal es la base de un enfoque que se presenta en [17], [19], [22], [23], [24]. Un banco de datos de la matriz de impedancia de secuencia en función de la velocidad del motor para una máquina en condiciones de operación normal se utiliza durante el proceso de monitoreo. El método no se ve afectado por las imperfecciones de la construcción y los desequilibrios de la red de alimentación, ya que estos se han tenido en cuenta durante la construcción del banco de datos [16]. Otro método robusto con alta sensibilidad usando la matriz de impedancia de secuencia se introduce en [25].

1.3.2.5 Análisis de la forma de la señal de la corriente (MCSA)

El análisis espectral de la corriente constituye un complemento para el diagnóstico mediante vibraciones ya que esta última tiene limitaciones al detectar problemas eléctricos en estado incipiente tales como excentricidades en el entrehierro, cortocircuitos entre vuelta-vuelta, en el devanado del estator y barras rotas en los rotores de las MI. La corriente de estator en las MI contiene generalmente armónicos que se deben a que la disposición de los devanados en las ranuras no es perfectamente simétrica, y la señal no es senoidal sino escalonada a las imperfecciones en la fabricación y a las posibles componentes armónicas presentes en la red de alimentación. Ante un cortocircuito en algunos de los devanados del estator, ya sea entre devanados o vuelta-vuelta de la misma fase o entre devanados

de fases diferentes, la configuración de la fuerza magnetomotriz giratoria se ve afectada y como consecuencia, las componentes armónicas de las corrientes del estator también se ven afectadas en sus amplitudes [17], [18], [5], [20], [22], [23], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34]. Teniendo en cuenta esto último, y realizando un seguimiento periódico del espectro de frecuencias de las corrientes del estator es posible detectar pequeños cortocircuitos y evitar consecuencias drásticas. Es importante destacar que, las componentes afectadas son función del deslizamiento y por ende la frecuencia a la que se manifiestan depende del estado de la carga de la máquina. La variación de la amplitud en las componentes armónicas que se ven afectadas en una falla cambian con la carga del motor, por lo cual, es conveniente realizar las comparaciones para estados de carga similares. La incidencia de una falla sobre cada componente armónica varía de una máquina a otra y depende fundamentalmente de las características del devanado. En algunos casos, inclusive, algunas componentes pueden reducir su valor ante una falla. Por desgracia estos componentes varían bajo diferentes condiciones de carga y también son sensibles a las asimetrías inherentes del motor y los desbalances de la red de alimentación.

1.3.2.6 Vector complejo de Park (CPV)

La transformación de Park (CPV por sus siglas en inglés), permite referir las variables de una máquina trifásica a un sistema de dos ejes en cuadratura. El seguimiento continuo del fasor espacial que surge de la aplicación de dicha transformación se puede emplear con fines de diagnóstico [4], [19], [20], [22], [23], [24], [27], [29], [30], [32], [33], [35]. Las componentes de la corriente del estator en los ejes directo y en cuadratura (D y Q) fijas al estator se obtienen por medio de las siguientes relaciones:

$$I_D = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_A - \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_B - \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_C \quad (1.23)$$

$$I_Q = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot I_B - \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot I_C \quad (1.24)$$

Donde: I_A , I_B e I_C son las corrientes de las fases A, B y C del estator.

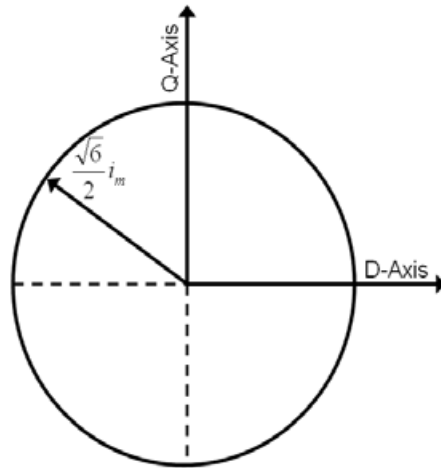


Figura 1.6 Representación del vector de Park en una situación ideal [4].

En condiciones ideales, cuando una máquina sin falla se alimenta a través de un sistema 3ϕ de corriente senoidal, equilibrado y secuencia positiva, las componentes del VCP determinan una circunferencia centrada en el origen del plano $D - Q$ tal y como se muestra en la figura 1.6, en estas condiciones el módulo de la corriente del VCP es constante y coincidente con la magnitud de Park y el radio de la circunferencia.

En caso de un cortocircuito en devanados del estator, la máquina se comporta como una carga desequilibrada y las corrientes del estator dejan de constituir un sistema balanceado. En la figura 1.7a, se representa la corriente del VCP de una MI que posee un estator asimétrico, se observa que está centrada en el origen de cuadratura $D - Q$ (igual que en la figura 1.6) pero a diferencia con esta, ya no se encuentra en el mismo plano $D - Q$, si no que esta girado respecto a este plano por el propio centro de coordenadas. En la figura 1.7b, se representa el módulo de la corriente del VCP, el cual se observa de forma senoidal y ya no es constante (como en la figura 1.6). El módulo de la circunferencia que forma el VCP de la corriente al representarla es constante, pero como esta circunferencia se encuentra girada con respecto al plano $D - Q$ desde este mismo plano el módulo deja de ser constante.

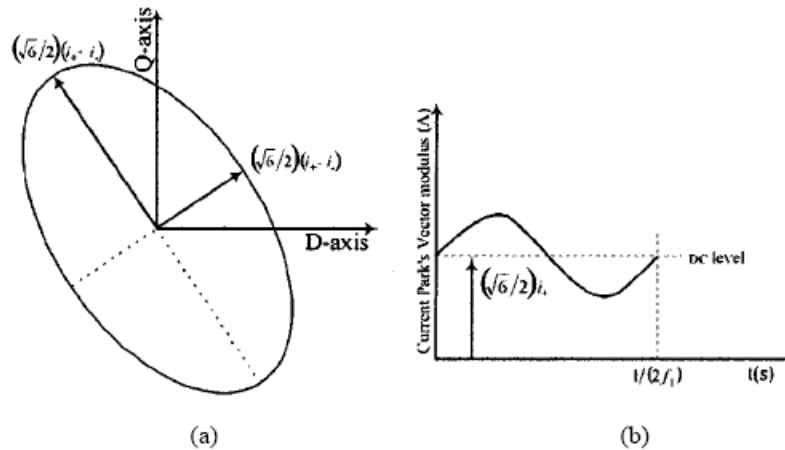


Figura 1.7 (a) Representación de la corriente del vector de Park (b) Representación del módulo de la corriente Vector de Park, ambos de una máquina de inducción con el estator asimétrico [4].

El VCP es empleado por algunos autores para la detección de excentricidades en el rotor [20], [22], [23], [27], [29], [30], [33], [35].

1.3.2.7 Análisis armónico del torque y la potencia (THA)

El análisis armónico de la potencia total (THA por sus siglas en inglés), consumida por la MI, de algunas de las potencias parciales o bien del par eléctrico, permite la detección de algunas de las fallas que se producen con mayor frecuencia en las MI [17], [23], [24], [27], [36], [37], [38]. Se utiliza la medida de la potencia ya que como la potencia es el producto de la tensión de alimentación por la corriente consumida, posee un espectro en el cual la fundamental a 50 o 60 Hz casi desaparece, apareciendo a 100 o 120 Hz que es el resultado del producto de la tensión por la corriente, mientras que los efectos próximos a 50 o 60 Hz quedan visibles, puesto que ya no se enmascaran. Cuando existe una falla en la MI, tal como una falla en el rotor, un problema de alineamiento en el eje, rotura de algún diente del rodamiento, en definitiva cualquier variación en la corriente, torque, o velocidad de la máquina afectan a la potencia consumida por la misma. Las potencias parciales presentan, ante una falla en el rotor, componentes a la frecuencia $2sf_1$ y bandas laterales alrededor del doble de la frecuencia de la red. Tales componentes, ausentes en condiciones normales, permiten detectar y ponderar la gravedad de una falla. La

potencia total, por su parte, se verá afectada por medio de una componente a la frecuencia $2sf_1$. El par interno representa la combinación de los efectos de todos los enlaces de flujo y las corrientes tanto del estator como el rotor. Este es muy sensible a cualquier desbalance [36]. La potencia instantánea en una máquina eléctrica rotatoria es la suma de los productos de la tensión e intensidad de cada fase que componen dicha máquina, tal cual como se indica en la ecuación siguiente:

$$P = V_a \cdot i_a + V_b \cdot i_b + V_c \cdot i_c \quad (1.25)$$

Ahora bien la tensión de alimentación se puede descomponer como la suma de los enlaces de flujo:

$$V_a = \frac{d\psi_a}{dt} + r \cdot i_a \quad (1.26)$$

$$V_b = \frac{d\psi_b}{dt} + r \cdot i_b \quad (1.27)$$

$$V_c = \frac{d\psi_c}{dt} + r \cdot i_c \quad (1.28)$$

Aplicando la fórmula anterior de la tensión de cada fase como la sumatoria del enlace de flujo más la resistencia por la intensidad de la fase que la recorre y sustituyéndolas en la ecuación de la potencia instantánea, la fórmula que se obtendría es la siguiente:

$$P = \left(\frac{d\psi_a}{dt} + r \cdot i_a \right) \cdot i_a + \left(\frac{d\psi_b}{dt} + r \cdot i_b \right) \cdot i_b + \left(\frac{d\psi_c}{dt} + r \cdot i_c \right) \cdot i_c \quad (1.29)$$

Para obtener el enlace de flujo de cada fase, se despeja de la ecuación de la tensión de alimentación de fase. Y se obtiene el enlace de flujo de cada fase a través de la integral de la diferencia de la tensión de alimentación y la intensidad que recorre la resistencia del cobre de cada fase.

$$\Psi_a = \int (V_a - r \cdot i_a) dt \quad (1.30)$$

$$\Psi_b = \int (V_b - r \cdot i_b) dt \quad (1.31)$$

$$\Psi_c = \int (V_c - r \cdot i_c) dt \quad (1.32)$$

El par interno de la M.I. simétrica calculado mediante la tensión e intensidad del estator resulta como:

$$Par[Nm] = \frac{P\sqrt{3}}{6} \cdot \langle (2i_A + i_C) \cdot \int [V_{CA} - R(i_C - i_A) \cdot dt - (i_C - i_A)] \int [-V_{BA} - R(2i_A + i_C) \cdot dt] \rangle \quad (1.33)$$

Ahora bien, la forma tradicional de representar las ecuaciones de las ME está basada en la teoría de los campos rotativos, pero existe una forma más compacta y simplificada de representarlas basada en la teoría de los vectores espaciales D - Q. Aplicando la transformada de Park, el par interno o electromagnético se representa como [36]:

$$Par = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\Psi_D \cdot i_Q - \Psi_Q \cdot i_D) \quad (1.34)$$

Dónde:

i_D, i_Q = proyecciones del vector corriente sobre los ejes D y Q;

Ψ_D, Ψ_Q = enlaces de flujo totales según los ejes D - Q.

Las derivadas de los enlaces de flujo de cada uno de los espacios D - Q son:

$$\frac{\partial \Psi_D}{\partial t} = (V_D - R \cdot i_D) \cdot \omega_b \quad (1.35)$$

$$\frac{\partial \Psi_Q}{\partial t} = (V_Q - R \cdot i_Q) \cdot \omega_b \quad (1.36)$$

Dónde: R = resistencia del estator.

De las ecuaciones anteriores se deduce que conociendo la descomposición de los vectores de tensión y corriente según los ejes directo (D) y de cuadratura (Q) e integrando para el cálculo de los enlaces de flujo se puede obtener el par electromagnético. Asumiendo que la velocidad de la máquina es prácticamente constante, puede asegurarse que el par electromagnético de la máquina presenta las mismas componentes que la potencia y, por ende, puede emplearse para detectar fallas [23], [35] , [36].

1.3.2.8 Redes Neuronales (ANN)

Las ANN imitan el funcionamiento del cerebro humano (figura 1.8). Las ANN se han usado para el reconocimiento de imágenes y sonidos, para el procesamiento de

datos y señales, y como clasificadores. El empleo de las ANN para la detección de fallas en MI ha sido estudiado en [5], [17], [19], [20], [22], [23], [32], [35], [39], [40]. Por ejemplo una red neuronal se entrena de manera tal que pueda predecir el valor de la corriente de secuencia negativa de la máquina a partir de la corriente de secuencia positiva y de las tensiones de ambas secuencias. Luego el valor de la secuencia negativa estimado se compara con el medido y en base a dicha comparación se determina el estado de la falla.

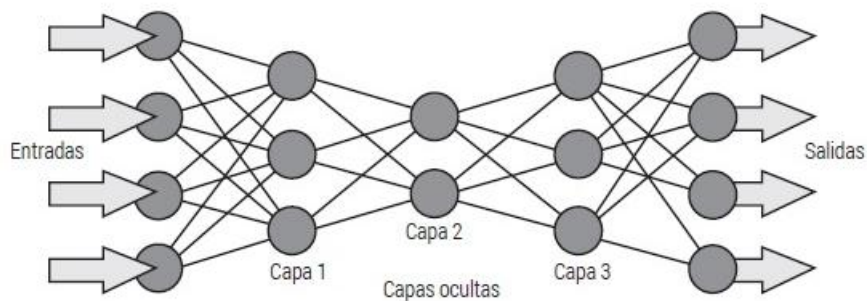


Figura 1.8 Estructura de una red neuronal [20].

Conclusiones parciales

Existen dos tipos de métodos para la detección de las fallas mecánicas y eléctricas: los invasivos y los no invasivos.

Es importante en muchos casos, llevar a cabo medidas periódicas y comparar los resultados. De hecho, el análisis del espectro de frecuencia del estator, por ejemplo, es eficaz si se comparan los niveles armónicos con los obtenidos con el motor funcionando sin falla.

Se destaca que los métodos no invasivos de detección de fallas han evolucionado rápidamente en los últimos años y la tendencia muestra que su uso en la práctica va en aumento.

CAPÍTULO 2. Materiales y métodos

Introducción

En este capítulo se describirán los materiales y el método empleado para la obtención de la onda de corriente de estator de un motor asincrónico trifásico y las herramientas desarrolladas para proceder al análisis espectral de dicha corriente para poder proceder a realizar la aplicación de los conceptos sobre MSCA descritos en el capítulo 1.

2.1 Instrumentación

En la figura 2.1 se muestra una foto del motor sometido a investigación. Los datos de chapa del mismo se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Datos nominales del motor trifásico escogido para la experimentación

1 kilowatt (kW)	Delta/estrella: 220/380	4 polos	Corriente nominal: 4.8A /2.77 A
-----------------	-------------------------	---------	---------------------------------

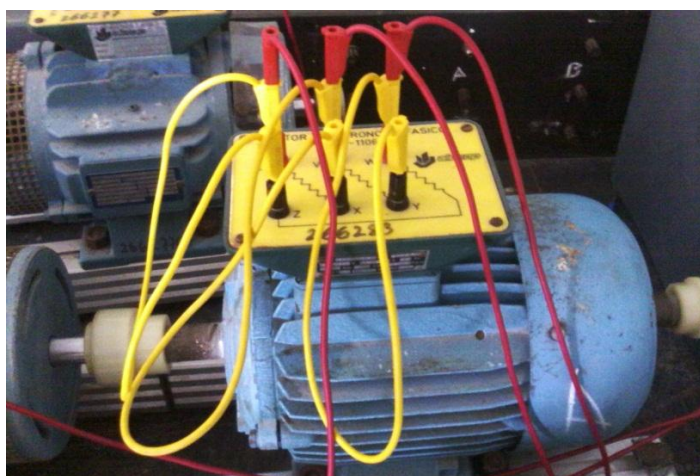


Figura 2.1 Motor de corriente alterna

Para poder dar carga a este motor se acopló por su eje una máquina de CD(en este caso una máquina AI-506 que funcionará como generador, la cual a su vez será conectada a una carga resistiva (reóstato 3300 de 470 Ω y 1000W) a través de su armadura lo que permite regular la salida del generador de forma tal que el motor de

inducción consume 3.6 amperes como mínimo, para cumplir con lo descrito en este método de MCSA a la hora de su aplicación para determinar defectos en las barras del rotor.



Figura 2.2 Máquina de corriente directa (funcionando como generador).

Con el fin de muestrear la forma de onda de la corriente se empleó un osciloscopio digital RIGOL MSO1074Z de fabricación china, ver figura 2.3. Como es conocido el osciloscopio responde a señales de tensión, por lo que; para producir una tensión con una forma de onda similar a la corriente, dicho osciloscopio fue conectado a través de una resistencia de $8,8 \, \Omega$ en el secundario de un transformador de corriente del Fabricante Metra Blansko, modelo TL 20, con relaciones de transformación de corriente nominales de 0.5-1-1-5-10-20-50-100/5 A, burden nominal 5VA, clase 0.05, para el cual se escogió una relación de transformación de corriente ($I_1/I_2=10/5=2$) para la protección del osciloscopio y no superar la potencia máxima del mismo.

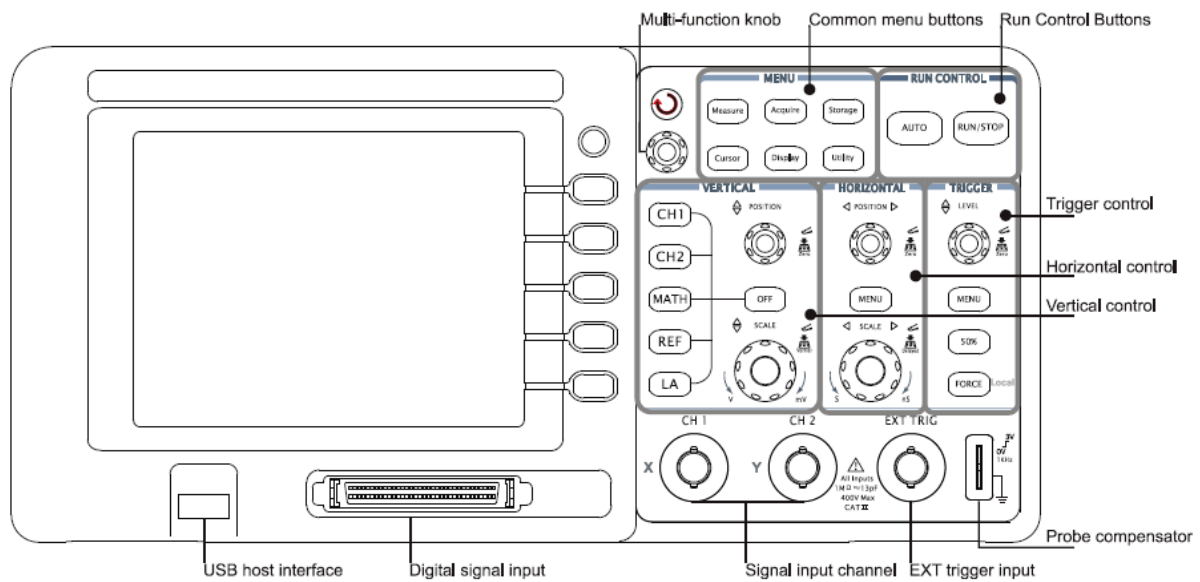


Figura 2.3 Osciloscopio digital RIGOL MSO1074Z.

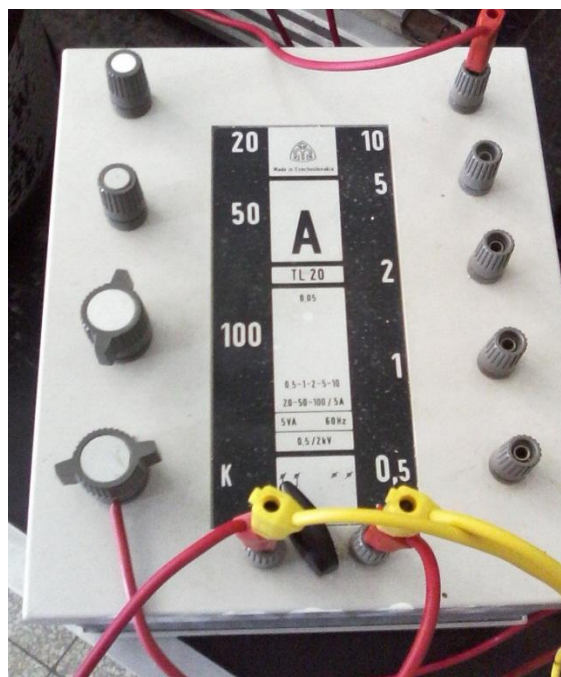


Figura 2.4 Transformador de corriente

Como en el método MCSA la velocidad del rotor es un parámetro fundamental, por cuanto define los valores de las bandas laterales, la velocidad a la que gira el

conjunto motor de inducción- generador de CD se mide con un tacogenerador (Ver figura 2.5) .

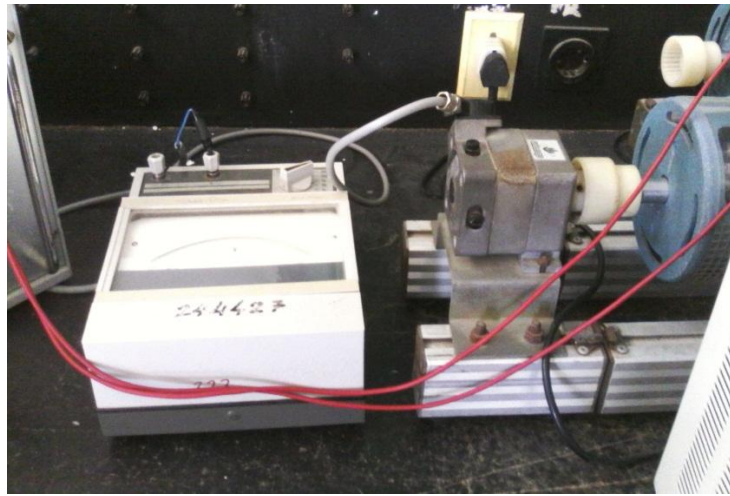


Figura 2.5 Tacogenerador e indicador de velocidad

Después de haber muestreado la forma de onda con el osciloscopio se le descargó hacia una memoria USB la cual después fue llevada hacia una computadora para realizar el tratamiento digital de dicha señal capturada.

2.1 Procesamiento de los datos

Primeramente para realizar el procesamiento de los datos se van a enunciar los conceptos fundamentales para el tratamiento de la señal con la transformada rápida de Fourier (FFT).

2.1.1 La transformada rápida de Fourier (propiedades y limitaciones)

Para calcular la FFT se debe tener en cuenta el muestreo de la señal: una vez que se han convertido las señales inicialmente continuas en discretas, ya no se podrá realizar una representación completamente exacta en ninguno de los dos dominios. La solución a este problema pasa por realizar una discretización que nos permita obtener un número de muestras lo bastante elevado. Así definirá un registro de tiempo como N muestras consecutivas e igualmente espaciadas de la señal de entrada. Si se dispone de un registro de N muestras igualmente espaciadas en el tiempo, se podrá obtener $N/2$ líneas de espectro igualmente espaciadas en el

dominio de la frecuencia. El motivo por el cual se obtiene dicho número de líneas se puede comprender si se tiene en cuenta que en el dominio de la frecuencia una señal se debe representar mediante dos parámetros: amplitud y fase. La necesidad de conocer el valor del ángulo de desfase de cada componente senoidal es evidente, ya que sin él no sería posible reconstruir la señal original. Una vez que se ha visto como el espectro de frecuencias estará constituido por una serie de líneas igualmente espaciadas, se va a definir cuál es la máxima resolución que se puede obtener. La frecuencia más baja que se podrá resolver con un analizador de espectros usando la FFT está determinada por la longitud del registro de tiempo. Si el período de la señal que se está analizando es mayor que la duración del registro de tiempo, no existe forma de determinar su frecuencia. Por tanto, la línea de frecuencia más baja del espectro, se produce a un valor igual a la inversa de la longitud del registro de tiempo [11].

$$f_{\text{máx}} = \frac{N}{2} \cdot \frac{1}{\text{Longitud del tiempo de registro}} \quad 2.1$$

2.1.2 Solapamiento.

El Aliasing es un problema que surge en la práctica, es decir cuando se realiza la medición de la señal que se desea analizar. Esto es debido a una ambigüedad que se produce al discretizar una señal periódica senoidal, tal y como podría ser la intensidad correspondiente a una fase de una máquina eléctrica, la cual es una de las magnitudes más utilizada en la detección y diagnóstico de fallas. Es decir, el aliasing es un efecto el cual causa que señales continuas en el tiempo se vuelvan indistinguibles cuando son discretizadas. Algunos autores al aliasing lo denominan “solapamiento”, ya que en el dominio de la frecuencia se produce un traslado de la señal hacia la señal siguiente, provocando un solapamiento. Este solapamiento altera la forma del espectro ya que las frecuencias que se han solapado se suman entre sí, provocando dicha alteración. Puede llegar a ocurrir que cuando se discretiza una señal se obtengan las mismas muestras que se obtendrían de otra señal senoidal pero con frecuencia más baja. O que una vez discretizada la señal al volverla a su estado continuo dé una señal senoidal pero de menor frecuencia.

Para evitar este problema, se aplica el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon (1928) el cual consiste en muestrear a una frecuencia mayor que el doble de la frecuencia más alta que contenga la señal que se desea muestrear. De esta forma se garantiza la coherencia de la señal discretizada [4].

Como se ilustra en la Figura 2.6, la señal que se desea discretizar es una señal periódica senoidal pura representada en color rojo. La frecuencia de muestreo utilizada no cumple el criterio de Nyquist y por tanto, si se retorna al estado continuo la señal discretizada se obtiene una señal diferente, representada en color azul, la cual es de menor frecuencia que la señal que se deseaba discretizar.

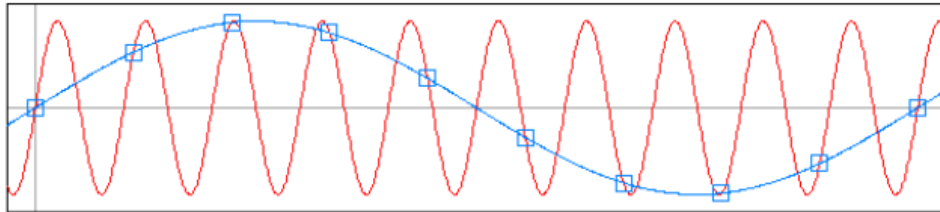


Figura 2.6 Señal senoidal periódica muestreada a una frecuencia inferior al criterio de Nyquist [4]

Por tanto el aliasing se produce por una elección errónea de la frecuencia de muestreo. Parece evidente pensar, que la resolución del problema consiste en escoger una frecuencia de muestreo adecuada, resultando esta labor nada fácil. En la Figura 2.7, se han seleccionado dos frecuencias de muestreo, la figura superior no cumple el teorema de Nyquist mientras que la figura inferior si lo cumple. Como se observa en la Figura 2.7 superior se produce un solapamiento entre diferentes bandas en el dominio de la frecuencia, lo cual provoca que se distorsione la señal hasta el punto de retornarla al dominio del tiempo como otra señal diferente a la real.

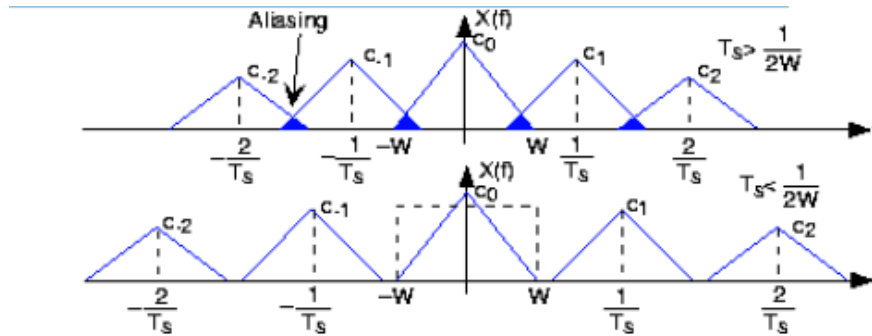


Figura 2.7 Representación en frecuencia de una señal muestreada a una frecuencia que no cumple el criterio de Nyquist produciéndose el aliasing, mientras que en la de debajo si cumple el criterio [4].

Por último decir que los sistemas de digitalización para eliminar el aliasing incluyen filtros anti-aliasing, que no son más que un filtro paso bajo, el cual elimina todas las frecuencias que sobrepasen la frecuencia crítica de la señal que se desea discretizar. La frecuencia crítica será la mitad de la frecuencia de muestreo elegida. Hay que tener cuidado a la hora del conexionado pues el abuso de estos filtros desemboca en la producción del mismo efecto que se desea evitar [4].

2.1.3 Ventanas.

Las ventanas se encargan de buscar que el primer y el último dato muestreado tengan el mismo valor de amplitud, de esta forma aseguran que el número de muestras coinciden. De esta forma reducen o evitan el efecto de dispersión que se produce al realizar la transformada discreta de Fourier.

Existen diversos tipos de Ventanas, como por ejemplo la rectangular que se puede observar en la Figura 2.8.-a, la de Hanning en la Figura 2.8.-b y la triangular en la Figura 2.8.-c.

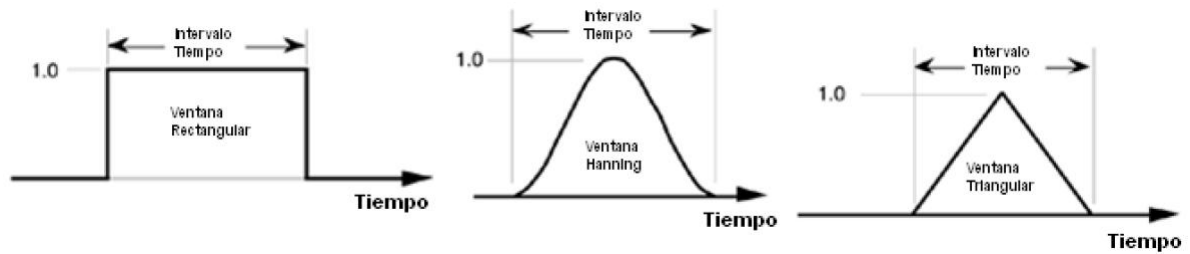


Figura 2.8 Representación de diferentes Ventanas (a) rectangular (b) hanning (c) triangular [4].

Sea una señal tal como la que se muestra en la Figura 2.9, la cual representa una señal senoidal pura e infinita en el tiempo.

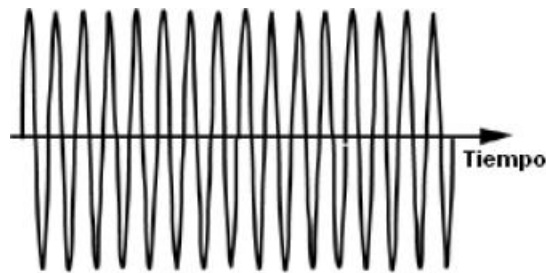


Figura 2.9 Representación de una señal senoidal infinita en el tiempo [4].

Si a la señal anterior representada en la Figura 2.9 le aplicamos por ejemplo al discretizarla las tres ventanas mostradas en la Figura 2.8, como resultado se obtiene lo que se observa en la Figura 2.10. Se puede comprobar de forma visual que tanto el primer valor como el último que toma la ventana, sea del tipo que sea, coinciden en amplitud disminuyendo por tanto el riesgo de que aparezca el efecto de dispersión.

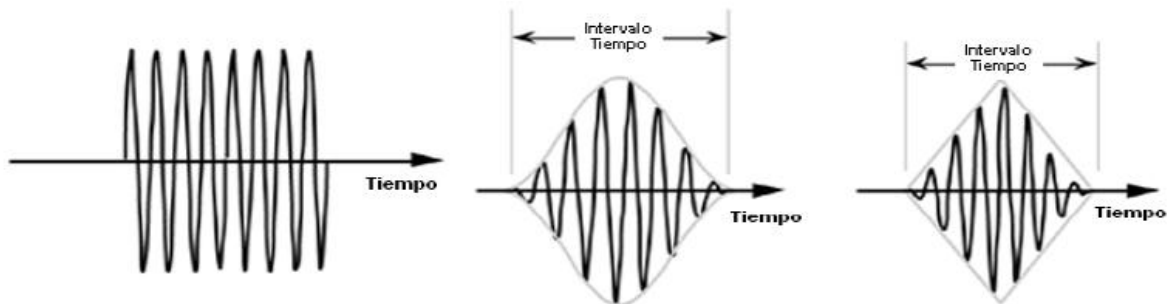


Figura 2.10. Representación de muestrear una señal senoidal infinita mediante Ventana (a) rectangular (b) hanning (c) triangular [4].

En el procesamiento de los datos se utiliza una ventana hanning para el espectro de potencias mediante periodograma de Welch.

2.1.4 Adicción de ceros a la señal.

Esta técnica o método es muy popularmente conocido y no es más que la adición de ceros a la señal de entrada. Consiste en la adición de ceros a la señal continua a discretizar, es decir se añaden los ceros que se desean y de esta forma se incrementa el tiempo de la señal continua. Cada cero añadido es una muestra más, por tanto sí aumentamos el tiempo de la señal continua aumentamos los puntos a discretizar. Y por tanto la resolución de la señal.

Para clarificarlo de una forma inmediata y visual se adjunta la Figura 2.11, en la cual se representan en ella diversos ejemplos a los cuales se les añaden diferentes cantidades de ceros dejando en evidencia el efecto de tal técnica.

En la Figura 2.11-a a la izquierda se representa la señal continua en el tiempo a analizar de entrada, la figura situada a la derecha se obtiene como resultado de la transformada discreta de Fourier de la señal de entrada ubicada en el lado izquierdo.

En la Figura 2.11-b izquierda se representa la misma señal de entrada pero añadiéndole 16 ceros, lo que provoca que la señal posea 16 muestras más. Para este caso concreto en el cual poseía inicialmente 16 muestras y se le añaden 16 más, serán 32 las muestras totales, por tanto ahora tenemos en la parte derecha representada la transformada discreta de Fourier la cual posee más puntos característicos que la anterior. En la Figura 2.11-c izquierda se representa la misma señal de entrada pero añadiéndole 48 ceros. En la parte derecha se representa la transformada discreta de Fourier la cual posee más puntos característicos que la anterior, definiendo mucho mejor la señal ya que se perfila su traza.

En la Figura 2.11-d izquierda se representa la misma señal de entrada pero añadiéndole 112 ceros, lo que provoca que la señal posea 128 muestras en total. En la parte derecha se representa la transformada discreta de Fourier la cual posee una traza totalmente definida, evidentemente presenta una mayor resolución [4].

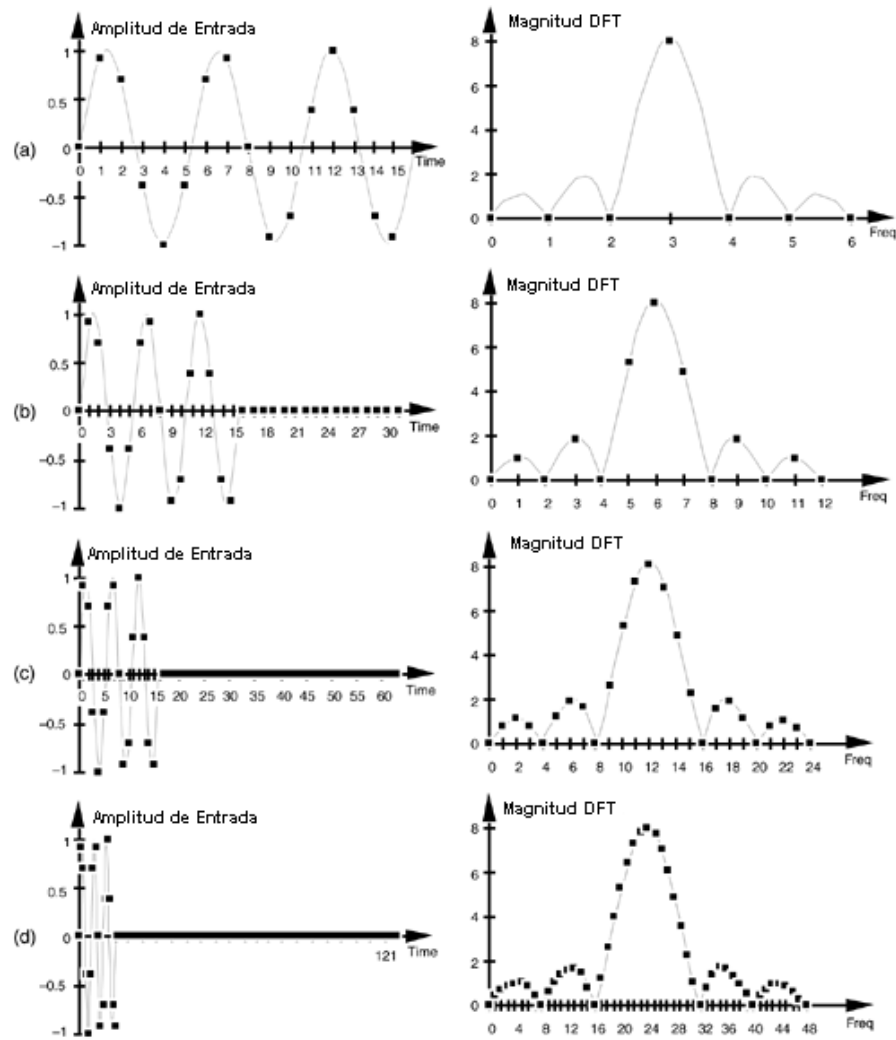


Figura 2.11 Representación de la discretización de una señal (a) sin adición de ceros (b) añadiendo 16 ceros a la señal original (c) añadiendo 48 ceros a la señal original (d) añadiendo 112 ceros a la señal original [4].

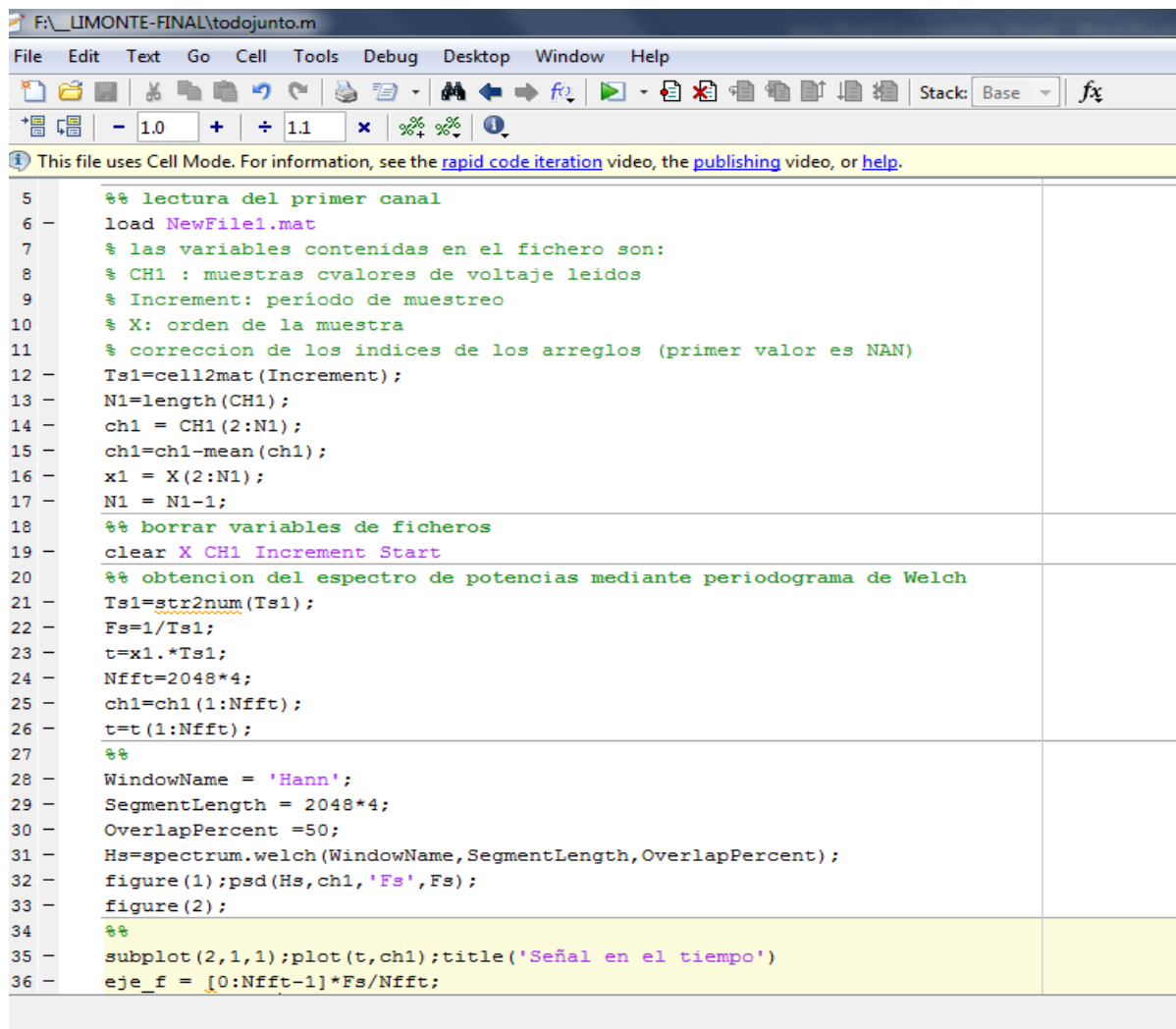
Esta técnica resulta muy efectiva, debido a que no siempre es posible realizar mediciones de tiempo infinito o suficientemente largo como para obtener una buena resolución, y de esta forma aunque la medida de la señal a analizar que se tome no sea de larga duración, es decir sea una medida corta se puede completar mediante la adicción de ceros para obtener una mayor resolución.

Se le agregaron 8192 ceros para así mejorar la resolución considerablemente ya que las bandas laterales cuando la máquina no presenta fallas tiene unos picos muy pocos pronunciados y son difíciles de presenciar.

Se plantearon los conceptos fundamentales para el trabajo con la FFT por lo que ya se puede pasar al tratamiento de la señal.

Primero se descargó un fichero en formato csv (valores separados por coma) del osciloscopio digital que es una de las ventajas que presenta este instrumento para después cargar el fichero en el matlab para exportarlo a un archivo .mat para así poder trabajar con los datos descargados.

Se implementó un programa en matlab para aplicarle el espectro de potencias mediante periodograma de Welch (tiene gran resolución ya que va pasando una ventana por todo el tiempo de muestreo) el cual emplea la FFT.



```
5 %% lectura del primer canal
6 load NewFile1.mat
7 % las variables contenidas en el fichero son:
8 % CH1 : muestras cvalores de voltaje leidos
9 % Increment: período de muestreo
10 % X: orden de la muestra
11 % correccion de los indices de los arreglos (primer valor es NAN)
12 Ts1=cell2mat(Increment);
13 N1=length(CH1);
14 ch1 = CH1(2:N1);
15 ch1=ch1-mean(ch1);
16 x1 = X(2:N1);
17 N1 = N1-1;
18 %% borrar variables de ficheros
19 clear X CH1 Increment Start
20 %% obtencion del espectro de potencias mediante periodograma de Welch
21 Ts1=str2num(Ts1);
22 Fs=1/Ts1;
23 t=x1.*Ts1;
24 Nfft=2048*4;
25 ch1=ch1(1:Nfft);
26 t=t(1:Nfft);
27 %%
28 WindowName = 'Hann';
29 SegmentLength = 2048*4;
30 OverlapPercent =50;
31 Hs=spectrum.welch(WindowName,SegmentLength,OverlapPercent);
32 figure(1);psd(Hs,ch1,'Fs',Fs);
33 figure(2);
34 %%
35 subplot(2,1,1);plot(t,ch1);title('Señal en el tiempo')
36 eje_f = [0:Nfft-1]*Fs/Nfft;
```

Figura 2.12 Programa en el Matlab

CAPÍTULO 3. Análisis de los resultados obtenidos

Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de la aplicación del método no invasivo conocido como MCSA a un motor de inducción trifásico, mediante la metodología y la herramienta computacional descrita en el capítulo anterior. A partir del análisis del espectro de frecuencia obtenido mediante dicha herramienta y la comparación con los resultados obtenidos en la bibliografía consultada y la inspección física del motor en cuestión se demostrará la validez del procedimiento elaborado.

3.1. Consideraciones sobre el espectro de frecuencia y su relación con el tipo de defecto presente en las barras del rotor de un motor de inducción.

En la tabla 3.1 se reflejan los criterios para el diagnóstico de daños en las barras a partir de la comparación entre la amplitud en Decibeles entre las bandas lateral inferior y la componente fundamental.

Tabla 3.1 Criterios de diagnóstico de daños en las barras del motor [11].

Diferencia de amplitud entre banda lateral inferior y componente fundamental (dB)	Diagnóstico
Diferencia ≥ 49	Motor sano
$46 \leq \text{Diferencia} < 49$	Algún punto de alta resistencia
$44 \leq \text{Diferencia} < 46$	Varios puntos de alta resistencia
$39 \leq \text{Diferencia} < 44$	Muchos puntos de alta resistencia o una barra rota
$35 \leq \text{Diferencia} < 39$	Al menos una barra rota
Diferencia < 35	Varias barras rotas

Un requisito adicional y de peso en este criterio es que el motor tiene que operar de un 50% a un 85% de su carga nominal, ya que cuando este está operando en vacío o subcargado el motor gira muy próximo a la velocidad sincrónica por lo que dificulta detectar las bandas laterales, ya que el deslizamiento es muy próximo a cero y tienden a introducirse en el armónico fundamental.

Como ya se expresó en el capítulo 1, esas bandas laterales aparecen a una frecuencia dada por la ecuación 1.10 que se repite aquí por comodidad.

$$f_B = |f_1 \cdot (1 \pm 2 \cdot s)|$$

Donde; como ya se ha señalado, s es el valor del deslizamiento. Para calcular el mismo es necesario haber medido la velocidad, en este caso a través del tacómetro se obtuvo el valor de 1699 rpm y por tanto s tomará un valor de 0.0561.

La frecuencia a la que aparecerá la banda lateral inferior para dicho valor del resbalamiento será:

$$f_{li} = (1 - 2 \cdot 0.0561) \cdot 60$$

$$f_{li} = 53.26 \text{ Hz}$$

Mientras que el valor de frecuencia al cual se manifestará la banda lateral superior corresponderá a:

$$f_{ls} = (1 + 2 \cdot 0.0561) \cdot 60$$

$$f_{ls} = 66.73 \text{ Hz}$$

Con el fin de obtener una buena resolución, entiéndase separación entre la fundamental y las bandas laterales descritas encima se fijó en el elemento de adquisición de la señal (en este caso el osciloscopio digital) 2000 muestras por segundo y un tamaño de muestra de 8192 lecturas para un tiempo de muestreo de 4.09 segundos. Según el criterio definido por la ecuación:

$$\text{Resolución} = \frac{\text{muestra_por_segundo}}{\text{cantidad_de_muestras}} = \frac{2000}{8192} = 0.24 \text{ Hz}$$

De esta forma los espectros tendrán una resolución de 0.24 Hz y una frecuencia de Nyquist de 1000 Hz. Este sistema combina en forma adecuada una buena resolución de la frecuencia y sensibilidad a la señal. La primera característica es necesaria para

distinguir las componentes del espectro con precisión y la segunda, para identificar las fallas en formación.

Con las condiciones antes descritas se obtienen los valores de la señal muestreada, una parte de los cuales (por limitaciones de espacio en el presente trabajo) se muestran en el anexo 1.

En la figura 3.1 se muestra el resultado del procesamiento inicial de la señal adquirida con el osciloscopio, según el procedimiento descrito en el capítulo 2 del presente trabajo.

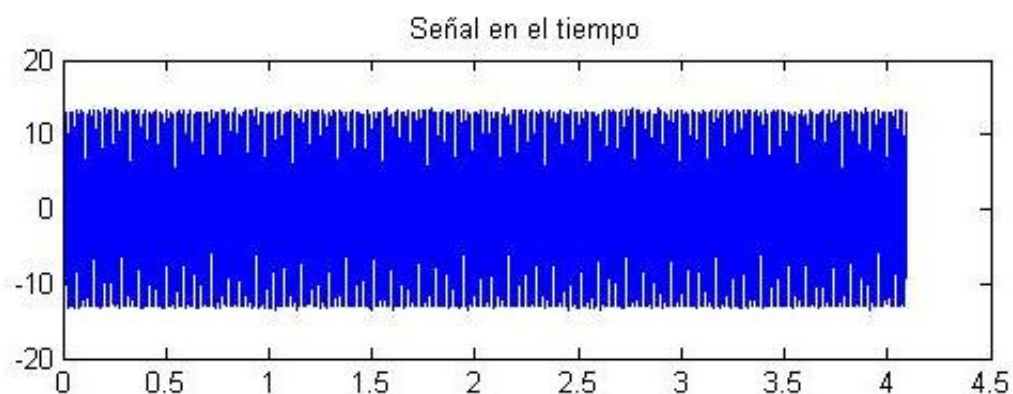


Figura 3.1 Forma de onda de la corriente

3.2. Aplicación de la FFT

Luego se procede a ejecutar el código elaborado en Matlab utilizando la FFT para obtener el espectro deseado. El mismo se muestra en la figura 3.2.



Figura 3.2 Espectro de frecuencia mediante la aplicación de la FFT

La FFT no muestra las bandas laterales por lo que se pasa a un tratamiento diferente de los datos utilizando la ventana Hanning y Espectro de potencias mediante periodograma de Welch para así obtener el espectro deseado. El mismo se muestra en la figura 3.3.

3.3. Aplicación de espectro de potencias mediante periodograma de Welch.

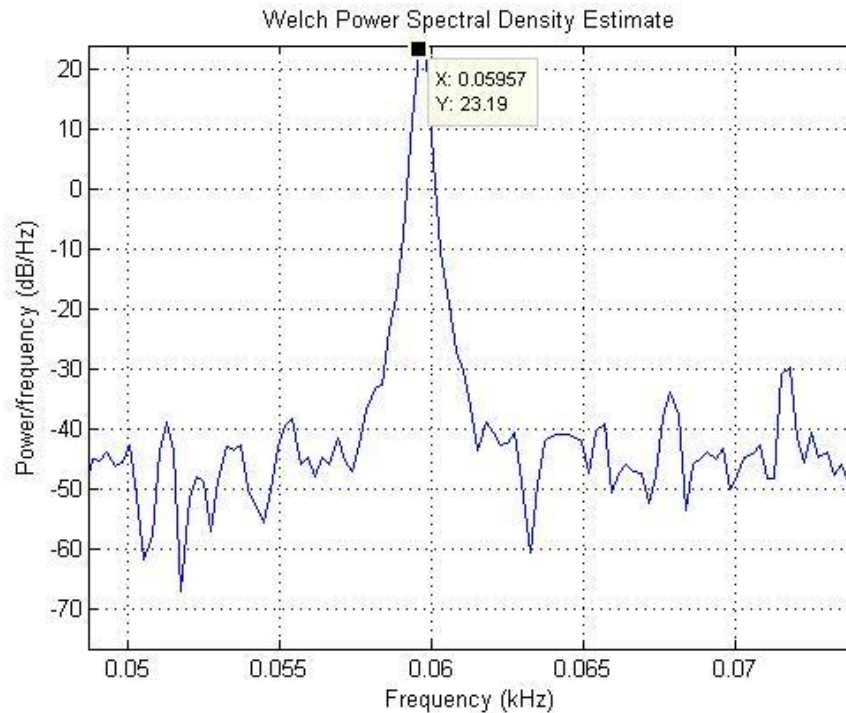


Figura 3.3 Espectro de potencias mediante periodograma de Welch.

En la figura 3.3 se aprecia la frecuencia fundamental que está en los 59.57 Hz con una amplitud de 23 dB.

Para el análisis de las posibles fallas, tal y como se describe en la tabla 3.1, es necesario establecer una comparación entre las amplitudes. Dicha comparación, aprovechando las ventajas del Matlab(en este caso la llamada data cursor) como se muestra en la figura 3.4.

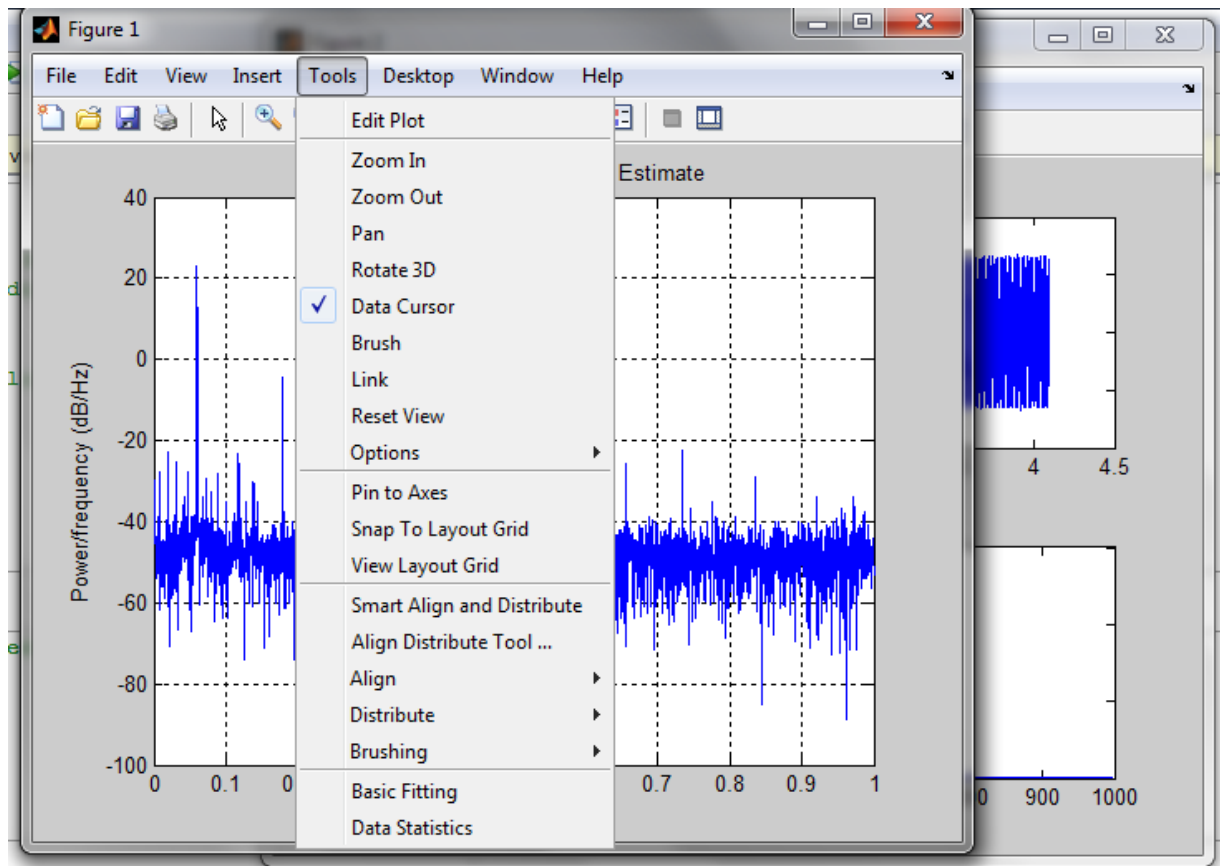


Figura 3.4 Herramienta Data Cursor del Matlab.

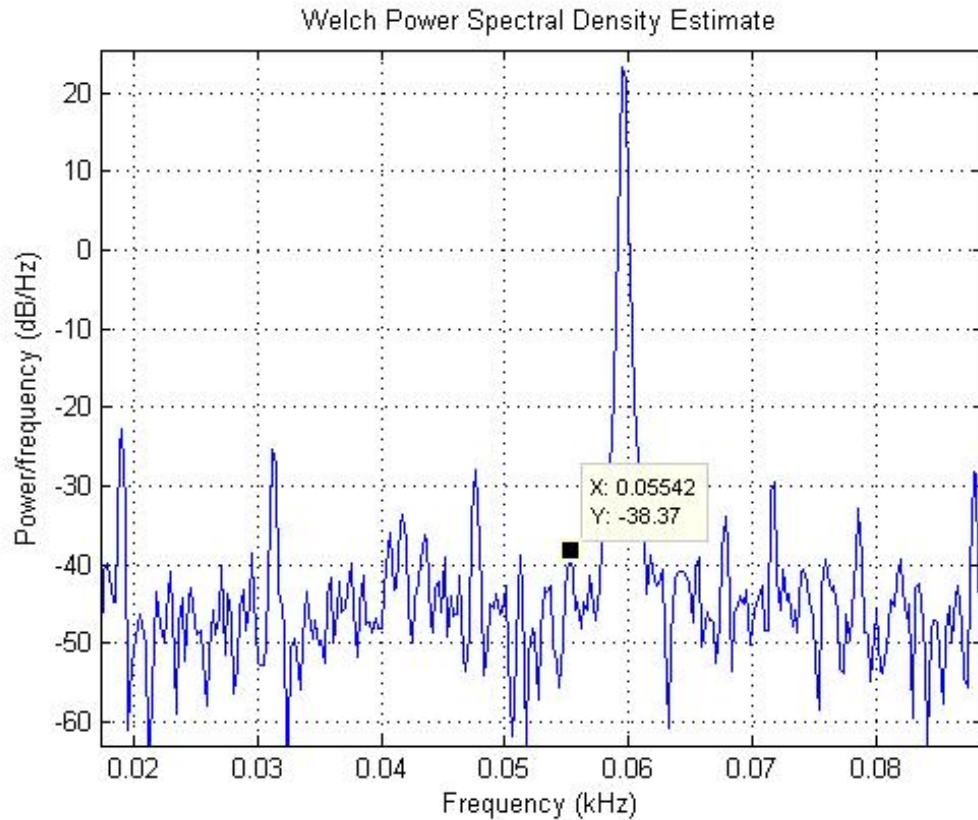


Figura 3.5 Espectro de potencias mediante periodograma de Welch.

En la figura 3.3 se aprecia la banda lateral inferior la que está en los 55.42 Hz con una amplitud de -38 dB.

La diferencia que presenta la banda lateral inferior y la fundamental es de 61 dB lo que nos lleva a la conclusión esperada de que no hay falla en el motor y la validez de esta aplicación.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se estableció el marco teórico para la detección de la ruptura de las barras de los motores así como se identificó los parámetros necesarios para realizar este diagnóstico así como los instrumentos necesarios.

Se demuestra que para aplicar el método de MCSA es necesario capturar al menos 2000 muestras/segundo durante 4 segundos de la forma de onda de una de las corrientes estatóricas.

Queda demostrado que mediante un osciloscopio digital se es capaz de obtener datos suficientes para aplicar el método de MCSA.

Se implementó en matlab una herramienta capaz de mostrar el espectro de frecuencia de una de las corrientes estatóricas.

Se verifico mediante el uso de la metodología descrita que el motor sometido a ensayos no presenta rotura en ninguna de sus barras mediante la comparación del espectro de frecuencia obtenido con resultados reflejados en la bibliografía consultada y la inspección física del mismo.

RECOMENDACIONES

- Continuar investigando sobre los métodos no invasivos debido a su gran importancia en la industria.
- Implementar la aplicación obtenida a un motor con roturas en las barras para validar el mismo en dichas condiciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Jordy and H. Eduardo. (2012). *El motor eléctrico*. Available: <http://www.definicionabc.com/motor/motor-electrico.php>
- [2] i. D. D. Sánchez, "Diagnóstico de fallas en motores de inducción tipo jaula de ardilla mediante la aplicación de métodos híbridos," Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Santiago de Cali, 2011.
- [3] G. B. Kliman, J. Stein, R. D. Endicott, and M. W. Madden. (1988, Diciembre 1988) Noninvasive Detection of Broken Rotor Bars in Operating Induction Motors. 873-879.
- [4] R. Puche, "NUEVOS MÉTODOS DE DIAGNOSIS DE EXCENTRICIDAD Y OTRAS ASIMETRÍAS ROTÓRICAS EN MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE INDUCCIÓN A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DE LA CORRIENTE ESTATÓRICA," Doctoral, Departamento Ingeniería Eléctrica, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, Valencia, 2008.
- [5] S. Nandi and H. A. Toliyat. (2005) Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review. 719-729.
- [6] I. L. Kerzenbaum. (1984, July 1984) The Existence of Large Inter-Bar Currents in Three Phase Squirrel Cage Motors with Rotor-Bar And/Or End-Ring Faults. 1854-1862.

- [7] R. F. L. Walliser. (1994, March 1994) Determination of interbar current effects in the detection of broken rotor bars in squirrel cage induction motors. 152-158.
- [8] M. Castelli. (2006) Desarrollo de un equipo para la realización de mantenimiento predictivo en motores asíncronos de gran porte.
- [9] J. A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, J. R. Folch, and M. P. M. Palomares. (2006) Validation of a new method for the diagnosis of rotor bar failures via wavelet transform in industrial induction machines. 990-996.
- [10] G. B. Kliman and J. Stein, "Induction motor fault detection via passive current monitoring," in *Proc. Int. Conf. Electrical Machines*, Cambridge, 1990.
- [11] C. M. Fernández, M. M. García, O. G. Alonso, R. J. M. Cano, and S. J. Solares, *Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotatorias*. MARCOMBO, S.A., 1998.
- [12] R. Schoen. (1995, Nov / Dec 1995) Motor bearing damage detection using stator current monitoring. 1274-1279.
- [13] C. Kral, T. G. Habetler, and R. G. Harley. (2004) Detection of mechanical imbalances of induction machines without spectral analysis of time-domain signals. 1101-1106.
- [14] S. Nandi, S. Ahmed, and H. A. Toliyat. (2001) Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages. 253-260.

- [15] Elawgali, "Effect of combined eccentricities on the spectrum of induction machine currents," 2004.
- [16] H. Zulma Yadira Medrano, T. Carlos Pérez, T. Marcos Alberto de Armas, and H. César Amaro. (2013, 18 de mayo de 2013) UN ESTUDIO SOBRE LA LOCALIZACIÓN, DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN MÁQUINAS ELÉCTRICAS. 37-59. Available: http://www.umng.edu.co/documents/10162/4585612/articulo_3.pdf
- [17] S. Grubic and J. M. Aller. (2008) A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems. 4127-4136. Available: http://prof.usb.ve/jaller/PPI_papers/CMD2008.pdf
- [18] J. Hidalgo. Análisis de las zonas de falla de motores eléctricos. Available: <http://fersddanka.files.wordpress.com/2011/02/fallas-electricas1.pdf>
- [19] R. Tallam and S. Lee. A survey of methods for detection of stator-related faults in induction machines. 920-933.
- [20] M. Sin, W. Soong, and N. Ertugrul. Induction Machine On-line Condition Monitoring and Fault Diagnosis-A Survey. Available: http://www.academia.edu/416441/Induction_Machine_on-Line_Condition_Monitoring_and_Fault_Diagnosis_A_Survey
- [21] M. Cash, T. Habetler, and G. Kliman. (1998) Insulation failure prediction in AC machines using line-neutral voltages. 1234-1239.
- [22] C. Verucchi, G. Acosta, and F. Bengier. (2008) A Review on Fault Diagnosis of Induction Machines. 113-121.

- [23] G. Acosta, E. Gelso, and M. Peñalva, "Sistema de monitoreo y diagnóstico de fallas para motores de inducción," in *Automatic Control*, Latin-American, 2002.
- [24] F. Villada, D. Parra, and G. Ocampo. (2007) Estudio del comportamiento de motores de inducción ante fallas estatóricas. 76-94.
- [25] S. Lee and R. Tallam. (2003) A robust on-line turn-fault detection technique for induction machines based on monitoring the sequence component impedance matrix. 865-872.
- [26] M. Castelli, J. P. Fossati, and M. Andrade. (2008) Metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos de inducción. 9-17. Available: http://www.um.edu.uy/upload/investigacionweb/investigacion_50_Memoria_2_MetodologiadeMonitoreo.pdf
- [27] A. Siddique, B. Singh, and G. S. Yadava. (2005) A review of stator fault monitoring techniques of induction motors. 106-114.
- [28] W. Thomson and M. Ferger. (2001) Current signature analysis to detect induction motor faults. 26-34.
- [29] R. Puche and J. Pons, "Review diagnosis methods of induction electrical machines based on steady state current."
- [30] J. Aguado, "Análisis de Fallas en Motores de Inducción utilizando la corriente estatórica, Diseño y construcción de prototipo basado en un Microcontrolador."
- [31] N. Mehla and R. Dahiya. (2007) An approach of condition monitoring of induction motor using MCSA. 13-17.

- [32] M. Awadallah and M. Morcos. (2003) A application of AI tools in fault diagnosis of electrical machines and drives-an overview. 245-251.
- [33] M. Hachemi. (2000) A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection. 984-993.
- [34] I. Culbert and W. Rhodes. (2007) Using current signature analysis technology to reliably detect cage winding defect in squirrel-cage induction motors. 422-428.
- [35] G. Acosta and C. Verucchi. (2007) Técnicas de Detección y Diagnóstico de Fallos en Máquinas Eléctricas de Inducción. 41-49.
- [36] R. Puche, "Nuevos Métodos de Diagnosis de Excentricidad y otras Asimetrías Rotóricas en Máquinas Eléctricas de Inducción a través del Análisis de la Corriente Estatórica," Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 2008.
- [37] S. Günel, D. Gökhan, and Ö. Nezir. Induction machine condition monitoring using notch-filtered motor current. Available: <http://www.mm.anadolu.edu.tr/~gerek/Research>
- [38] S. Hedayati, H. Henao, and G. Capolino. (2010) Torsional vibration assessment using induction machine electromagnetic torque estimation. 209-219.
- [39] Y. Han and Y. Song. (2003) Condition monitoring techniques for electrical equipment-a literature survey. 4-13.
- [40] F. Villada and D. R. Cadavid. (2007, 2007) Diagnóstico de fallas en motores de inducción mediante la aplicación de redes neuronales

artificiales.

105-112.

Available:

<http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v18n2/art16.pdf>

ANEXOS

X	CH1	Start	Increment
Sequence	Volt	-3.00E+01	5.00E-04
0	1.30E+01		
1	1.32E+01		
2	1.28E+01		
3	1.12E+01		
4	9.60E+00		
5	8.00E+00		
6	5.00E+00		
7	2.60E+00		
8	-4.00E-01		
9	-2.80E+00		
10	-5.40E+00		
11	-7.60E+00		
12	-9.40E+00		
13	-1.08E+01		
14	-1.18E+01		
15	-1.22E+01		
16	-1.26E+01		

Anexo 1