

## ***“Metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos de inducción”***

**Castelli, Marcelo - Universidad de Montevideo. – IEEE Member**  
**Andrade, Marcos – ALFEX S.A. – IEEE Senior Member**

### **Resumen**

Dentro del programa de desarrollo tecnológico (PDT) la empresa ALFEX S.A. ha firmado recientemente un contrato para el desarrollo, en conjunto con la Universidad de Montevideo, de un equipo para detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos de inducción.

Durante el año pasado se ha trabajado principalmente en el estudio teórico de las principales fallas que típicamente suelen ocurrir, tales como cortocircuitos en los bobinados del estator, rodamientos dañados, excentricidad y desbalanceo en el rotor, rotura de barras y anillos en el rotor.

En este artículo se presentan los avances obtenidos en la ejecución del proyecto, las técnicas de detección utilizadas, los ensayos realizados en el banco de pruebas y los resultados de los mismos, con el fin de obtener una metodología eficiente de monitoreo, detección y diagnóstico de fallas en motores asíncronos de gran porte.

### **Introducción**

Estudios recientes indican que el 90% de los fallos en máquinas ocurren a raíz del funcionamiento anormal de los componentes internos, como es el caso del motor principal [1]. En esta línea, el mantenimiento correctivo 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. A pesar de esto, la mayoría de las industrias aún no utilizan técnicas de detección y monitoreo de máquinas eléctricas.

La detección y diagnóstico de fallas exige el empleo de sensores adecuados. 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.

Entre los parámetros a medir por estos sensores se pueden resaltar los siguientes: tensión y corriente en el estator, densidad de flujo magnético en el entrehierro, velocidad y posición del rotor, par entregado al eje, temperatura externa e interna, vibración, etc. Cuanto más sean los parámetros monitoreados (cada uno con su respectiva sensorización), mayor información puede llegar a extraerse con respecto al funcionamiento del motor.

Sin embargo, existen algunos inconvenientes relacionados con la cantidad y tipos de sensores a utilizar en el motor. Pueden destacarse el costo de la sensorización requerida, la dificultad en la instalación de los sensores y fallos en la sensorización al producir una parada no programada en la producción.

Los sistemas de monitoreo de motores eléctricos suelen detectar una variedad de fallas en el motor, tales como: cortocircuitos en los bobinados del estator, rodamientos dañados, excentricidad y desbalanceo en el rotor, rotura de barras y anillos en el rotor, problemas de ventilación, etc.

La sensorización de temperatura y vibración ha sido una técnica utilizada desde hace décadas para el monitoreo de motores asíncronos de inducción, sin embargo, recientemente los estudios se han centrado en el monitoreo de la parte eléctrica del motor, haciendo énfasis en el análisis de la corriente de estator. La mayoría de los estudios se han abocado al análisis del espectro de frecuencia de la corriente de estator, con el fin de determinar fallas en el motor.

Todas las técnicas de detección de fallas requieren un conocimiento previo de las medidas recolectadas, con el fin de distinguir situaciones normales de trabajo de las condiciones de operación bajo fallo. Esta exigencia, en cuanto al conocimiento del comportamiento normal de la máquina se magnifica cuando existe en ella una gran cantidad de armónicos provenientes

de características constructivas o de variación de la carga a la que se encuentra sometido el motor. Estas características especiales no deben ser confundidas con fallos existentes en el motor.

Muchos métodos de monitoreo han sido propuestos para la detección de fallos en motores asíncronos de inducción. Muchas máquinas eléctricas se encuentran provistas de distintos sensores con el fin de recolectar datos relevantes a su funcionamiento. Algunas de estas técnicas emplean sensores frágiles, de difícil instalación en el motor y de elevado coste. Sin embargo, el monitoreo de corriente de estator puede proveer las mismas informaciones sin necesidad de acceso a la parte interna del motor, ya que se trata de una técnica no invasiva, y pudiendo así reducir los costos de implementación.

En este artículo se recoge primero una breve descripción de los distintos tipos de fallos susceptibles de ocurrencia en motores eléctricos de inducción. Posteriormente se procederá a la presentación de la técnica utilizada para detección de fallas, así como también a la presentación del banco de ensayos que se ha construido con el fin de ensayar los distintos fallos tipificados. Finalmente se presentan los ensayos realizados y los resultados obtenidos para una problemática en particular, en este caso la rotura de barras.

### **Fallas en motores eléctricos de inducción:**

En este apartado son abordadas las principales fallas incipientes que ocurren en motores asíncronos de inducción. Fallas mecánicas y de aislamiento son discutidas y analizadas siendo enfatizadas sus causas y consecuencias.

La mayoría de las fallas en motores eléctricos pueden ser clasificadas en dos grupos: fallas de aislamiento y fallas mecánicas [2]. En [2] son brevemente presentadas las causas que pueden llevar a la ocurrencia de fallas en motores eléctricos de inducción.

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 desbalanceos.

En [3] se presentan las principales causas de fallas en el rotor y estator del motor.

### **Causas de fallas en el estator:**

#### **Solicitaciones térmicas:**

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. 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.

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.

Procedimientos normalizados, como por ejemplo AIEEE 510 e IEEE 275 revelan que cada 10°C que exceda la temperatura límite del aislamiento, la vida útil del mismo es reducida a la mitad [2] [3].

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 éstas alguna falla.

#### **Causas de sobrecarga térmica:**

##### **Variación de tensión**

Variaciones de tensión afectan la performance 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.

#### Tensión de fase desbalanceada

Un pequeño desbalanceo de fase causará un aumento de temperatura en los bobinados del estator. Se ha constatado que cada 3.5% de desbalanceo por fase, la temperatura del bobinado aumenta en un 25% en la fase de mayor corriente. Por ello se deben mantener las 3 fases lo mejor balanceadas posibles, con el fin de evitar la ocurrencia de este problema.

#### Arranques cíclicos

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.

#### Sobrecarga

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.

#### Obstrucción del sistema de ventilación

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.

### ***Solicitaciones eléctricas:***

#### Dieléctrico:

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 3 formas:

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

#### Efecto Corona:

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 3 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.

#### Sobretensiones de corta duración:

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

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 [2]. Las sobretensiones pueden ser producto de las siguientes condiciones:

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

### ***Solicitaciones Mecánicas:***

#### Movimiento de las espiras

El paso de corriente por los bobinados del estator produce esfuerzos directamente proporcionales al cuadrado de la corriente [3]. 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.

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.

#### Contacto entre estator y rotor

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.

#### Solicitaciones relacionadas al medio externo

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.

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

#### ***Solicitud térmica***

##### Sobrecarga térmica

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.

#### Desbalance térmico

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.

### ***Solicitud Magnética***

#### Efecto Electromagnético

Las fuerzas electromagnéticas son proporcionales al cuadrado de la corriente, siendo unidireccionales y tienden a dislocar las barras produciendo una deflexión en las mismas [3]. El mayor esfuerzo sobre las barras ocurre durante el arranque del motor, debido a las altas corrientes generadas.

#### Atracción electromagnética desbalanceada

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.

### ***Solicitaciones 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.

### ***Solicitaciones 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.

### ***Solicitaciones mecánicas***

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

En general los fallos en máquinas eléctricas se encuentran dominados por fallos en los rodamientos y en las bobinas del estator. Enfocados en motores asíncronos con rotor en jaula de ardilla, la estadística de fallos es la siguiente [4]:

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%

### **Métodos de detección de fallos**

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

En el Tabla 1 se realiza una comparación entre los principales métodos de detección de fallos, indicando las fallas que los mismos pueden detectar.

| Método      | Falla que puede detectar |                  |                 |             |
|-------------|--------------------------|------------------|-----------------|-------------|
|             | Corocircuito estator     | Rotura de barras | Excentricidades | Rodamientos |
| Vibración   | NO                       | SI               | SI              | SI          |
| MCSA        | SI                       | SI               | SI              | SI          |
| Temperatura | SI*                      | NO               | NO              | SI*         |
| Partículas  | NO                       | NO               | NO              | SI          |

\* Posibilidad de indicar indicio de falla

Tabla 1

Analizando la Tabla 1 se puede concluir que el método que es capaz de identificar el mayor número de fallos es el MCSA.

A lo largo de la ejecución de este proyecto se ha utilizado el MCSA como técnica de detección de fallos, la cual se basa en la utilización de la transformada rápida de Fourier de la señal de corriente del estator, con el fin de detectar los distintos tipos de fallos en función del estudio del espectro de frecuencia de la señal muestreada [5]

A continuación se presentará el banco de ensayos utilizado para la simulación de desperfectos y los resultados obtenidos basados en el método MCSA.

### **Banco de ensayos a utilizar.**

Para simular los desperfectos se ha construido un banco de ensayos acoplando dos motores de inducción trifásicos a través de poleas de diferentes diámetros. El motor a ensayar ha sido acoplado a la polea de mayor diámetro, actuando como generador el motor acoplado a la polea de menor diámetro. En la Figura 1 se puede apreciar una vista del banco de ensayos con ambos motores acoplados.



Figura 1: imagen del banco de ensayos

Posteriormente se ha caracterizado el motor a ensayar para conocer la condición inicial del mismo antes de simular desperfectos sobre el mismo.

Para la determinación del circuito equivalente del motor se han realizado dos ensayos, un ensayo de vacío y otro ensayo con el motor cargado. El circuito equivalente con el que se ha trabajado se presenta a continuación:

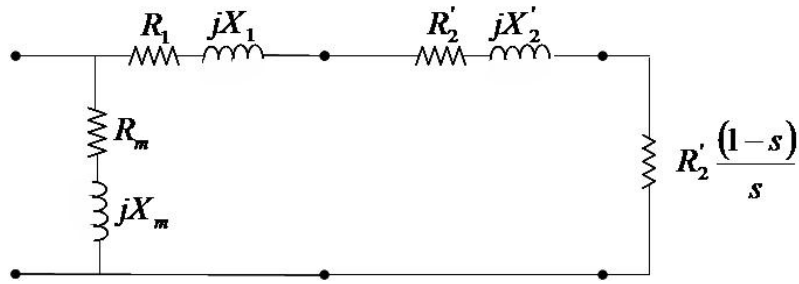


Figura 2: Circuito Equivalente

En donde:

|               |   |
|---------------|---|
| $R_1$         | Resistencia primario                              |
| $R_2'$        | Resistencia secundario vista desde el estator     |
| $X_1$         | Inductancia del primario                          |
| $X_2'$        | Inductancia del secundario vista desde el estator |
| $Z_m=R_m+X_m$ | Impedancia de magnetización                       |

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de vacío y en carga con el motor conectado en estrella:

Ensayo de vacío:

|    | <b>P (kW)</b> | <b>S (kVA )</b> | <b>FP</b> |
|----|---------------|-----------------|-----------|
| L1 | 0.03          | 0.51            | 0.07      |
| L2 | 0.07          | 0.5             | 0.132     |
| L3 | 0.08          | 0.5             | 0.154     |

Tabla 2: datos ensayo de vacío

|    | <b>Voltaje (<math>V_{rms}</math>)</b> | <b>Intensidad (<math>A_{rms}</math>)</b> |
|----|---------------------------------------|--|
| L1 | 130.3                                 | 3.9                                      |
| L2 | 129.5                                 | 3.9                                      |
| L3 | 130.1                                 | 3.8                                      |

Tabla 3: datos ensayo de vacío

Ensayo con motor en carga:

$$w_r = 1420rpm$$

$$w_s = 1500rpm$$

$$s = 0.0533$$

|    | <b>P (KW)</b> | <b>S (KVA )</b> | <b>FP</b> |
|----|---------------|-----------------|-----------|
| L1 | 0.93          | 1.12            | 0.825     |
| L2 | 1.01          | 1.19            | 0.843     |
| L3 | 0.98          | 1.17            | 0.836     |

Tabla 4: datos ensayo en carga

|    | <b>Voltaje (<math>V_{rms}</math>)</b> | <b>Intensidad (<math>A_{rms}</math>)</b> |
|----|---------------------------------------|--|
| L1 | 129.1                                 | 8.8                                      |
| L2 | 128.8                                 | 9.3                                      |
| L3 | 129.1                                 | 9.2                                      |

Tabla 5: datos ensayo en carga

A partir de estos ensayos se han obtenido los siguientes valores de los parámetros del circuito equivalente del motor:

|                    |                  |
|--------------------|------------------|
| $Z_m (\Omega)$     | 4.0131 +33.4252j |
| $R_1 (\Omega)$     | 0.6              |
| $R_2'(\Omega)$     | 0.8993           |
| $X_1+X_2'(\Omega)$ | 2.5103           |

Tabla 6: parámetros circuito equivalente

Luego de caracterizado el motor se ha pasado a la caracterización de los distintos fallos que se simularán en el banco de ensayos. En el presente artículo se enfocará el estudio a la presentación de una de los fallos más típicos en motores de inducción, la rotura de barras en el rotor del motor.

### **Detección de barras rotas:**

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

$$f_1 = N_s \cdot P$$

P= N° pares de polos  
 $f_1$ =frecuencia de alimentación de las bobinas del estator (Hz)  
 $N_s$ =Velocidad de sincronismo (rev/seg)

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

Definiendo el deslizamiento del rotor como:

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

Con:  $N_r$ =Velocidad del rotor

Entonces,

$$f_2 = (N_s - N_r) \cdot P$$

$$f_2 = s \cdot N_s \cdot P$$

Siendo:  $f_2$ = frecuencia de la corriente del rotor

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

$$N_r + N_2 = N_r + N_s - N_r = N_s$$

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

$$N_s - N_r = s \cdot N_s$$

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

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

$$N_b = N_r - s \cdot N_s$$

siendo :

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

$$N_r = N_s (1 - s)$$

Por lo tanto;

$$N_b = N_s - 2 \cdot s \cdot N_s$$

Expresándolo en términos de:

- Frecuencia ( $f_b$ )
  - Número de pares de polos
- $$f_b = (N_s - 2.s.N_s).P$$
- $$f_b = \left(\frac{f_1}{P} - 2.s.\frac{f_1}{P}\right).P$$
- $$f_b = f_1 - 2.s.f_1$$
- $$f_b = f_1(1 - 2.s)$$

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

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

Las oscilaciones en velocidad y torque que ocurren a la frecuencia  $2.s.f_1$  inducen la banda superior a una distancia  $2.s.f_1$  de la frecuencia de alimentación [6].

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

### **Ensayos realizados:**

Con el fin de corroborar las deducciones presentadas anteriormente, se han forzado la ruptura de 1, 2 y 3 barras del rotor.

En primera instancia se ha sensado la corriente consumida por el motor en una cierta condición de deslizamiento (la misma que se ha mantenido durante todos los ensayos siguientes) y realizada la FFT (fase Fourier transform) con el fin de determinar la condición del motor previa a la imposición de los desperfectos sobre el mismo.

Una vez determinada la condición inicial del motor se ha pasado a forzar desperfectos en el mismo, perforando una barra por vez y midiendo luego de esto las señales de corriente obtenidas.

Teniendo en cuenta que para todos los ensayos se ha utilizado un deslizamiento de  $s=0.0473$ , las bandas laterales de frecuencia correspondientes a las barras rotas deben corresponder a:

$$f_{b-} = 45.25Hz$$

$$f_{b+} = 54.75Hz$$

A continuación se presentan los resultados obtenidos de estos ensayos:

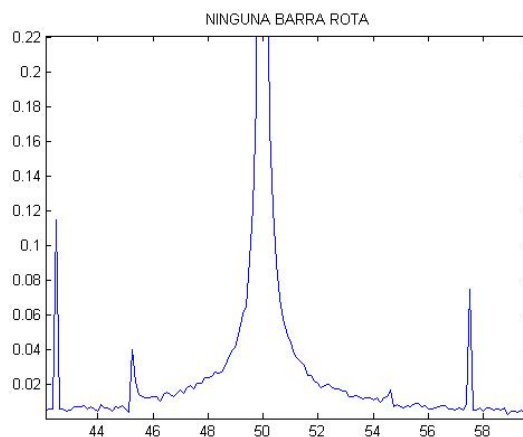


Figura 3: FFT-condición inicial

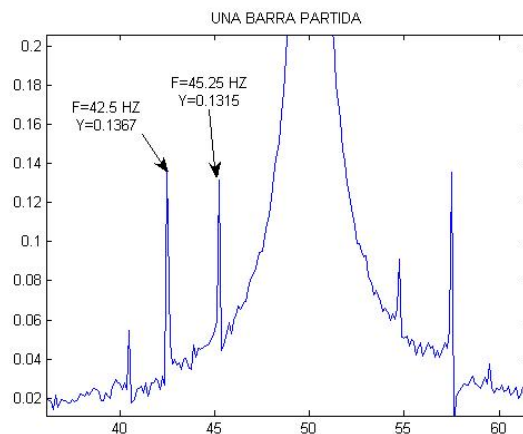


Figura 4: FFT-1 barra partida

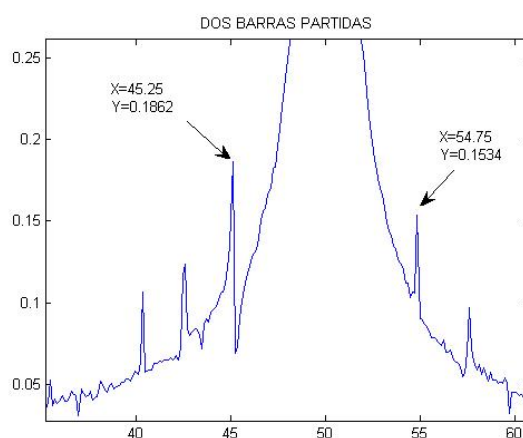


Figura 5: 2 barras partidas

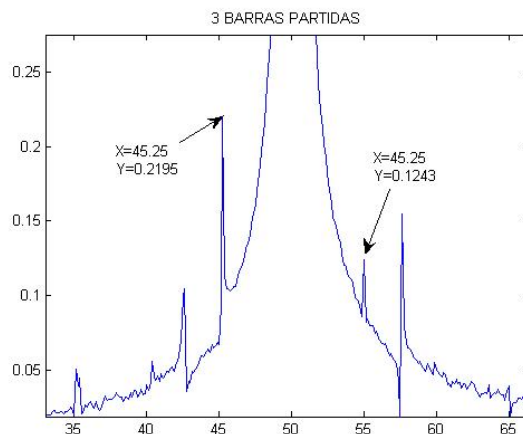


Figura 6: 3 barras partidas

Como se puede observar en las Figuras 3 a 6, las bandas laterales debidas a la rotura de barras aparecen efectivamente a los lados de la frecuencia principal, según lo reflejado en las frecuencias  $f_{b-}$  y  $f_{b+}$  y las amplitudes de estos armónicos aumentan a medida que crece el número de barras rotas en el motor.

### **Conclusiones:**

A partir de los ensayos realizados en el banco de pruebas, es posible concluir que es factible la realización de mantenimiento predictivo de motores asíncronos en cuanto a rotura de barras se refiere ya que se han conseguido resultados muy alentadores a través de la ejecución del proyecto. Es necesario recalcar que para la correcta implementación de la MCSA como herramienta de mantenimiento predictivo, es condición necesaria el previo conocimiento del estado de funcionamiento del motor y su evolución en el tiempo. Por lo cual es aconsejable realizar ensayos sobre el motor de forma periódica con el fin de determinar la evolución del motor y la posible aparición de desperfectos.

### **Bibliografía:**

- [1] Chow, M. Y. Methodologies of Using Neural Network and Fuzzy Logia Technologies for Motor Incipient Fault Detection. Singapore, World Scientific Publishing, 1997.
- [2] Botha, M. M. Electrical Machines Failure, Causes and Cures, Electrical Machines and Drives. 8va conferencia anual de IEEE, N° 444, pp. 114-117, 1-3 de Septiembre de 1997
- [3] Bonnet, A. H. et al. Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-cage Induction Motors. IEEE Trans. On Ind. Applic. Volumen 28, pp. 921-937, Julio-Agosto 1992.
- [4] Thomson, W.T.; Fenger, M. Case Histories of Current Signatura Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drives. Electrica Machines and Drives, IEMDC IEEE, Volumen 3; pp1459-1465, Junio 2003.
- [5] Castelli, M. Andrade, M. Portillo, A. Daoudian, N. Farinella, D. Casas, N. Desarrollo de un equipo para realización de mantenimiento predictivo en motores asíncronos de gran porte. URUMAN 2006. 16-18 Agosto 2006, Montevideo – Uruguay.
- [6] Thomson, W.T.; Gilmore, R. J. Motor Current Signature Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drives- Fundamentals, Data Interpretation, and Industrial Case Histories. Proceedings of 32rd Turbomachinery Symposium, 2003.

### **Autores**

Castelli Léméz, Marcelo Javier: Ingeniero Industrial, Universidad de Montevideo, 2004. PhD en curso (pendiente de defensa de tesis), Escuela de Ingenieros de San Sebastián TECNUN, Universidad de Navarra. Líneas de Investigación: accionamientos eléctricos lineales, control vectorial de máquinas eléctricas, diseño de generadores, MCSA. IEEE PES Chapter – Uruguay Section – Presidente 2007 – 2008.

Andrade Raffo, Marcos Tabaré: Formación académica: Ingeniero Electricista, Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, 1975. Especializaciones: puestas a tierra, sistemas de protección, mantenimiento de subestaciones, medida de aislamiento de máquinas rotativas. Director de ALFEX S.A. IEEE Senior Member. IEEE-Uruguay Section – Presidente 2006-2007.