

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

Castelli, Marcelo

Universidad de Montevideo. – IEEE Member

Fossati, Juan Pablo

Universidad de Montevideo

Andrade, Marcos

ALFEX S.A. – IEEE Senior Member

Resumen

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

Se realizaron tanto estudios teóricos como prácticos de las principales fallas que afectan a los motores de inducción: rotura de barras, cortocircuitos en los bobinados, rotura de rodamientos.

El desarrollo del dispositivo de mantenimiento se basó en el MCSA (Motor Current Signature Analysis). Esta metodología consiste en el análisis del espectro de frecuencia de la señal de corriente estatorica, con vistas de detectar los armónicos característicos de cada clase de defecto. En cuanto a los ensayos prácticos se simulaban diferentes tipos de fallas con vistas de verificar los resultados teóricos. Por último, como forma de validar la investigación en el ámbito industrial se realizaron diversos ensayos en motores 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. A continuación presentaremos los principales métodos de detección de fallos.

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) [2] [3] [4].

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			
	Cortocircuito estator	Rotura de barras	Excentricidades	Rodamientos
Vibración	NO	SI	SI	SI
MCSA	SI	SI	SI	SI
Temperatura	SI*	NO	NO	SI*
Partículas	NO	NO	NO	SI

* Posibilidad de indicar indicio de falla

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. Cada tipo de falla introduce en el espectro de corriente un armónico a una frecuencia determinada la cual depende del deslizamiento del motor. Es por lo tanto necesario medir las revoluciones del mismo cada vez que se realiza un ensayo. 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

Ensayos de barras rotas.

Metodología de trabajo

Con el fin de simular la rotura de barras se procedió a perforar las mismas con un taladro.



Figura 2: Rotor perforado



Figura 3: Rotor perforado

En las figuras 1 y 2 se puede apreciar el rotor del motor, podemos ver varias perforaciones en el centro de la jaula de ardilla. Sobre los bordes de esta se pueden distinguir claramente las barras. Una vez ensayado el motor sin ningún desperfecto se procede a sacar el rotor hacer la o las perforaciones necesarias y luego se vuelve a armar. Este proceso se repite hasta culminar con los ensayos.

Una vez realizada cada perforación es necesario lijar la jaula de ardilla de manera que no se produzca fricción entre el rotor y el estator. Otro punto importante a tener en cuenta es que hay que asegurarse que la perforación haya sido total (siempre y cuando esto sea lo requerido).

El motor ensayado cuenta con un total de 43 barras numeradas del 1 al 43. Para hacer referencia a la barra número x usamos la siguiente nomenclatura: bx. A continuación se enumeran y describen los ensayos realizados.

Ensayo 1: se ensayó el motor sin ninguna barra rota, 1429 rpm

Ensayo 2: se perforó una barra pero no de forma total. (b2), 1429 rpm

Ensayo 3: se perforó de forma total b2, total de barras rotas: 1, 1429 rpm

Ensayo 4: se perforó de forma total b5, total de barras rotas: 2, 1429 rpm

Ensayo 5: se perforó de forma total b8, total de barras rotas: 3, 1429 rpm

Resultados obtenidos y su correspondiente análisis.

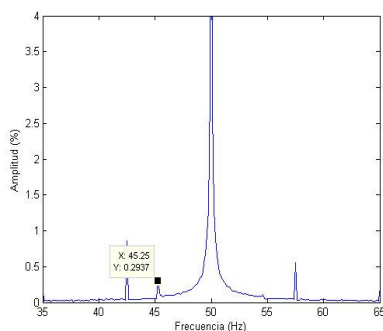


Figura 4: Ninguna barra rota

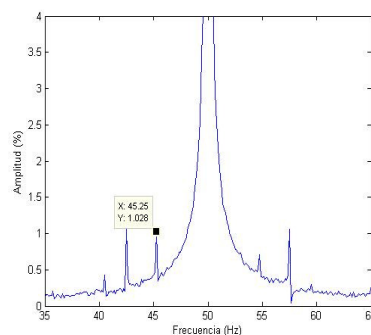


Figura 5: Una barra rota

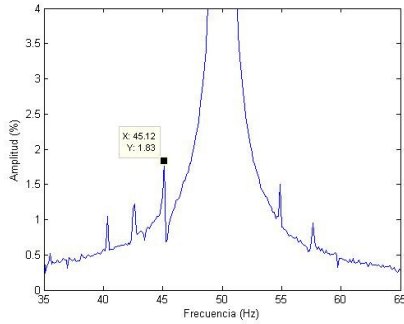


Figura 6: Dos barras rotas

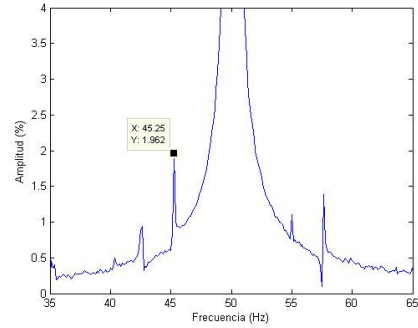


Figura 7: Tres barras rotas

Las figuras 4, 5, 6,7 corresponden respectivamente a ninguna, una, dos y tres barras rotas. En todos los casos se normalizo la amplitud de los armónicos con respecto al armónico principal. Todos los ensayos fueron realizados manteniendo la carga constante (1429 rpm). Veamos ahora cuales son las frecuencias características en donde tendrían que aparecer las componentes del defecto.

Revoluciones: 1429 rpm

$$s = \frac{1500 - 1429}{1500} = 0.0473$$

$$fc = f \cdot (1 \pm 2 \cdot s)$$

$$fc^+ = 54.7300 \text{ HZ}$$

$$fc^- = 45.2700 \text{ HZ}$$

En todos los casos se puede verificar la presencia de los armónicos correspondientes a las frecuencias características de la roturas de barras. Si bien esto es significativo, lo que se busca es poder determinar la existencia de una tendencia a medida que aumenta el número de barras rotas. La tabla 2 muestra la amplitud relativa de los armónicos asociados al defecto en función del número de barras. En la figura 8 se grafican dichos resultados. Es evidente que existe una relación directa entre el número de barras rotas y la amplitud relativa de los armónicos.

Frec (Hz)	Amp (%)	Nro Rotas	Barras
45.25	0,2937	0	
45.25	1,028	1	
45.25	1,83	2	
45.25	1,962	3	

Tabla 2



Figura 8: Evolución del defecto

Ensayos de corto circuitos

Metodología de trabajo

De los tres tipos de fallas simuladas, las de cortocircuito son las que presentan mayor dificultad técnica debido a la rápida evolución del defecto en el tiempo. De todos los tipos de cortocircuitos que se pueden dar en el motor, los que ocurren en una misma fase son los más difíciles de detectar (las protecciones no se activan). Es por esto que nos concentraremos en este tipo de fallas.

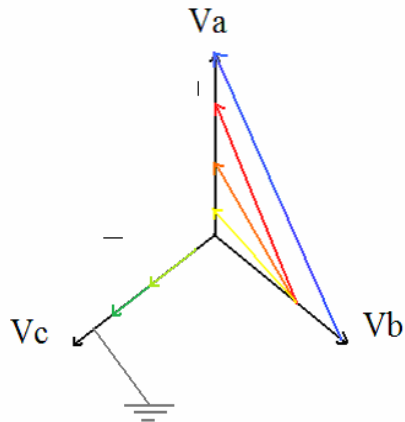


Figura 9: Diferentes tipos de cortocircuitos.

En la figura 9 se pueden ver los diferentes tipos de cortocircuitos posibles. En azul, naranja, amarillo y rojo se puede ver cortocircuitos entre dos fases de diferentes magnitudes. En gris se representa una falla a tierra y en verde dos cortocircuitos de una misma fase de diferente magnitud (estos son los defectos que se van a simular).

Como primer paso se procedió a identificar las diferentes fases del bobinado del estator.

Luego dentro de una misma fase se limó el barniz en diferentes niveles. Para evaluar la magnitud de los posibles cortocircuitos se conectó la fase a una fuente y luego se midió la diferencia de potencial entre los diferentes puntos. Estas medidas se expresaron como un porcentaje del voltaje de la fuente. Luego se colocaron conductores en los diferentes puntos limados y se sacaron hacia afuera por medio de un orificio en el estator. Para asegurarse de no haber producido algún cortocircuito no deseado se protegió el bobinado con una capa de barniz.



Figura 10: Estator del motor

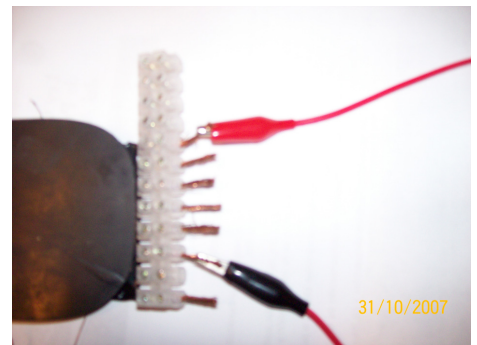


Figura 11: Fases cortocircuitadas

	1	2	3	4	5	6	7
1							
2			0.51	1.58	0.64	5.81	1.93
3		1.95%		1.15	0.11	6.34	1.39
4		6.05%	4.41%		1.02	7.51	0.22
5		2.45%	0.42%	3.91%		6.47	1.27
6		22.26%	24.29%	28.77%	24.79%		7.75
7		7.40%	5.33%	.84%	4.87%	29.69%	

Tabla 3: Magnitudes de los cortocircuitos.

La figura 10 muestra como una vez conectada la fuente se procedió a medir la diferencia de potencial entre los diferentes puntos para determinar la magnitud del cortocircuito. El resultado de esto dio origen a la tabla 3 en donde se expresa la diferencia de potencial y el nivel de cortocircuito que esta representa. Si bien se hicieron las conexiones con el fin de realizar varias pruebas solo se pudieron llevar a cabo unas pocas ya que el motor quedó dañado a causa de los cortocircuitos. En las fallas de mayor magnitud el motor se sobrecalienta y los conductores conectados a los diferentes puntos terminan por sobrecalentarse. Otro problema que se debió afrontar es el hecho que la frecuencia de falla para los cortocircuitos coincide con la de excentricidad por lo que para que los ensayos tengan sentido se mantuvieron las condiciones de carga. A continuación presentaremos los resultados obtenidos. Los ensayos fueron realizados a 1477 rpm ($s=0.015$). Para estas condiciones de funcionamiento la frecuencia de la falla es 25.38 Hz.

Resultados obtenidos y análisis

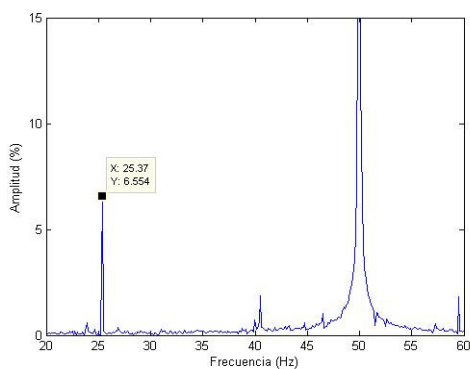


Figura 12: Sin cortocircuito

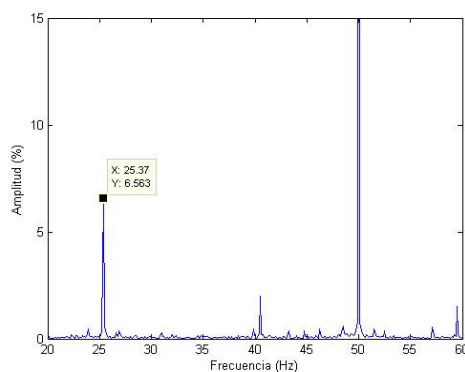


Figura 13: Cortocircuito de 1.5 %

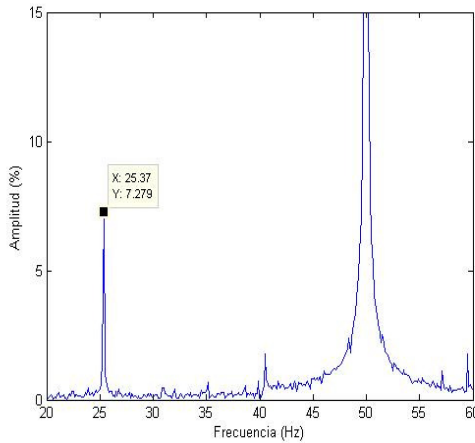


Figura 14: Cortocircuito de 2.45 %

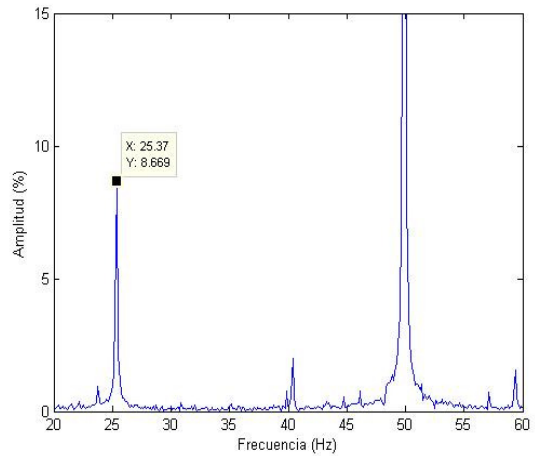


Figura 15: Cortocircuito de 4.41%

Frec (Hz)	Amp (%)	CC (%)
25.37	6,554	0
25.37	6,563	1,5
25.37	7,279	2,45
25.37	8,669	4,41

Tabla 4

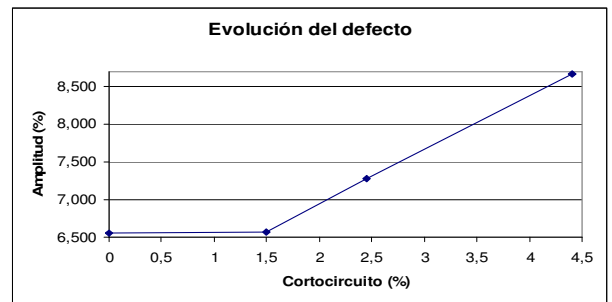


Figura 16: Evolución del defecto.

En la tabla 4 se pueden ver los cortocircuitos que fueron ensayados. Como se puede apreciar en las figuras 12, 13, 14,15 encontramos la presencia de un armónico para una frecuencia de 25.37 Hz. lo que coincide con lo predicho por la teoría (25.38Hz).Luego se graficó (figura 8.19) la magnitud de la componente a 25.36 Hz en función de la magnitud del defecto para ver si se puede observar una tendencia.

Se puede observar en la figura 16 que existe una marcada tendencia a medida que aumenta la magnitud de el defecto por encima del 1.5%. Si bien no se han hecho una cantidad suficiente de ensayos, se podría decir que es posible predecir la existencia de un cortocircuito que por su magnitud no haya producido que se activen las protecciones, pero que mas adelante podría dejar el motor fuera de servicio.

En motores de alto voltaje es muy escaso el tiempo que transcurre entre un cortocircuito dentro de una misma fase y un cortocircuito entre fases (segundos o minutos) por lo que una metodología de este tipo sería difícil de aplicar. En el caso de motores de bajo voltaje se podrían detectar cortocircuitos pero se requiere realizar los ensayos con una gran frecuencia debido al rápido desenlace que tienen este tipo de defectos en el tiempo.

Ensayos de rodamientos

Metodología de trabajo

Para simular fallas en los rodamientos se produjeron pequeños defectos en las bolas de los mismos. Al igual que en los casos anteriores se realizaron medidas con el motor funcionando en condiciones normales para luego ensayar diferentes condiciones de falla. Es importante tener en cuenta el número de bolas ya que de esto depende la frecuencia introducida en la corriente estatorica.

Resultados obtenidos y análisis

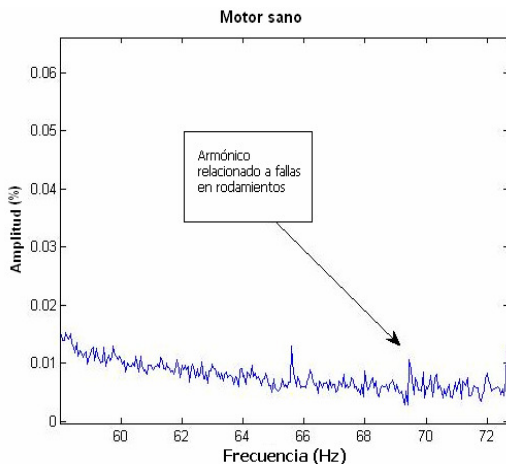


Figura 17: Motor sano

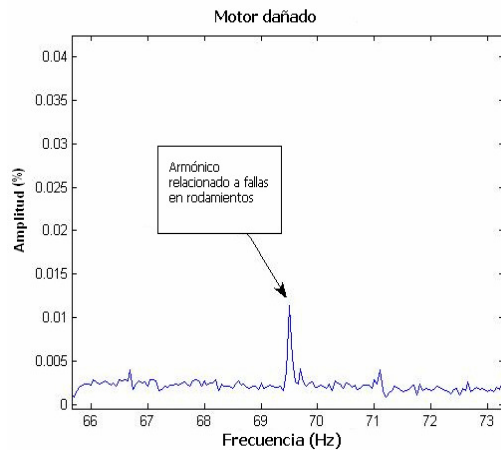


Figura 18: Motor dañado

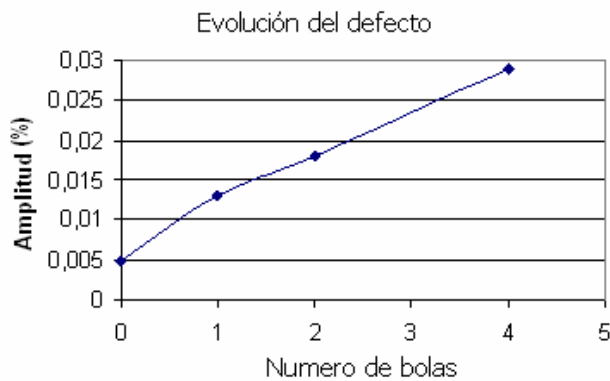


Figura 19: Evolución del defecto.

Resultados obtenidos y análisis

Comparando las figuras 17 y 18 (motor sano y dañado respectivamente) podemos constatar que es posible detectar la presencia de defectos en los rulemanes. En la figura 19 se puede ver una clara tendencia entre la presencia del defecto y la amplitud del armónico relacionado a la falla. Es posible concluir entonces que la metodología es valida para el diagnostico de fallas de rodamientos.

Conclusiones

A medida que se ensayaron los diversos tipos de fallas, se pudo constatar la viabilidad de la metodología de diagnóstico. Es importante destacar la versatilidad de la misma ya que puede implementarse para la detección de diversos tipos de fallas. A diferencia de otras técnicas de mantenimiento predictivo el MCSA probó ser de fácil implementación así como de alta confiabilidad a la hora de diagnosticar diversos tipos de fallas.

Bibliografía

[1] Chow, M. Y. Methodologies of Using Neural Network and Fuzzy Logic Technologies for Motor Incipient Fault Detection. Singapore, World Scientific Publishing, 1997.

[2] W.T.Thomson. A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrel-cage induction motors-past present and future.

[3] W.T.Thomson, Ronald J.Gilmore. Motor current signature to detect faults in induction motor drives-fundamentals, data interpretation, and industrial cases.

[4] William T.Thomson, Mark Frenger. Current signature analysis to detect induction motor faults. IEEE Industry applications magazine. July/August 2001