

Análisis de corriente como indicador de condición en máquinas eléctricas rotativas

Hermann C. G.^{a,b*}, Cabral R. J.^{a,b}, Perrone O. E.^{a,b}, Aguilar R.^{a,b}, Olivera M. O.^{a,b}, Mazzoletti A.^{a,b}

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

^b Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Energía Eléctrica - LIDEE, FI-UNaM, Oberá, Misiones, Argentina.

e-mails: cghermann95@gmail.com, robert_rjc@hotmail.com, perrone@fio.unam.edu.ar, ingenioli@gmail.com,
aguilar.rng@gmail.com, armando.mazzoletti@gmail.com

Resumen

El presente trabajo trata sobre la detección de fallas en motores eléctricos mediante el análisis de la firma de corriente del mismo. Se describe en qué consiste este tipo de análisis y la principal falla detectable mediante el mismo, las barras del rotor rotas. Luego, se explican las técnicas posibles de ser usadas para determinar la existencia de una falla y la severidad de la misma, como ser la transformada de Fourier y la Transformada Wavelet.

Palabras Clave – Barras Rotas, Firma de Corriente, Transformada de Fourier, Motor Eléctrico, Transformada Wavelet

1. INTRODUCCIÓN

En la era de la automatización industrial, es de gran interés la detección temprana de fallas y la técnica de diagnóstico para su uso en el mantenimiento preventivo basado en indicadores de condición, de manera confiable. En el caso particular de los motores eléctricos, algunos métodos se basan en el examen de parámetros no eléctricos como es el caso del estudio de vibraciones, temperatura, entre otros. El principal parámetro eléctrico analizado es la firma de corriente del motor (MCSA - Motor Current Signature Analysis). El sistema de monitoreo de corriente del estator en línea se ha utilizado para la detección de fallas del motor, para la cual se han propuesto varios enfoques buscando detectar diferentes tipos de fallas mecánicas internas como ser, barras del rotor rotas, fallas en los cojinetes, asimetría de entrehierro y desbalances en el rotor.

2. DESARROLLO

Análisis de la firma de corriente del motor

El monitoreo on-line de la corriente consiste en registrar la forma de onda en cualquiera de las tres fases del motor para luego analizar su espectro. El hecho de realizar las mediciones en línea significa que los datos para la técnica de análisis empleada se pueden obtener en todo momento cuando el motor está en funcionamiento.

Para medir la corriente, se utiliza un sensor que consiste en un toroide que mide el efecto electromagnético de la corriente que pasa a través de él, entregando una señal de voltaje proporcional a la magnitud de esta corriente. Dicha señal es recibida por un adquisidor de datos conectado a una computadora que, mediante la programación correspondiente a la técnica de detección de fallas a utilizar, realiza las operaciones pertinentes para poder diagnosticar el estado de la máquina. En la Figura 1 se muestra en un diagrama de bloques los principales pasos para el análisis.

* Hermann Carlos Gabriel – cghermann95@gmail.com - Facultad de Ingeniería, UNaM, Juan Manuel de Rosas 325 Oberá

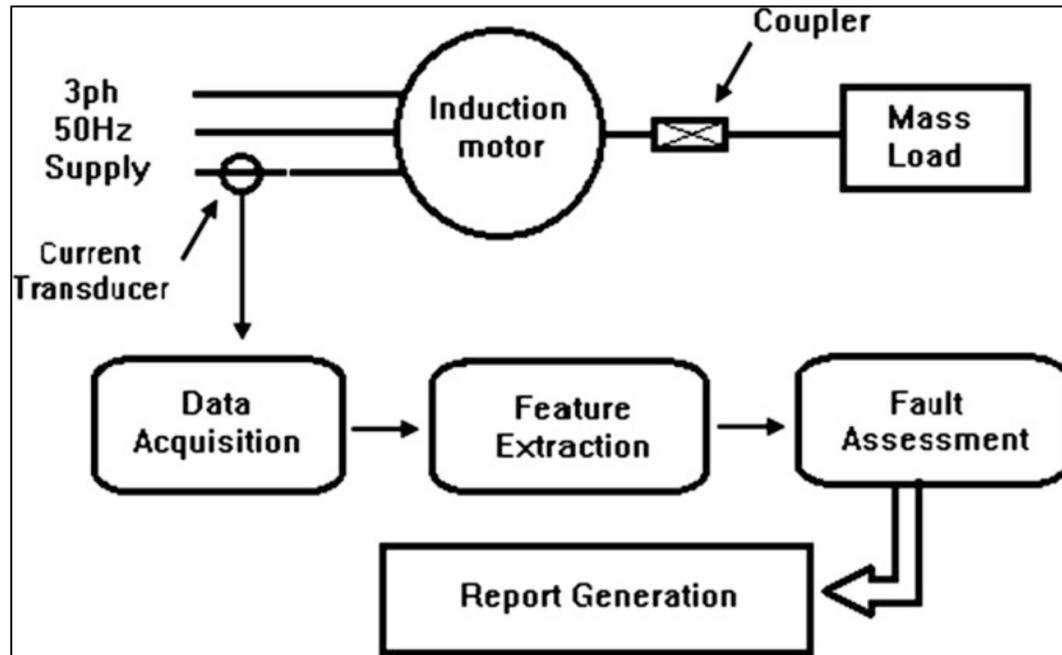


Figura 1. Diagrama de bloque MCSA. Fuente: [1]

El análisis de la corriente es una herramienta útil para detectar problemas en el motor que provoquen modulaciones periódicas en la corriente, buscando detectar los armónicos característicos de cada clase de defecto. Los pasos principales para la realización de MCSA son: adquisición de datos, extracción de características y evaluación de fallas.

El análisis de corriente del estator es una técnica no invasiva, precisa, de bajo costo, fácil y eficiente. Los datos para MCSA pueden ser una corriente de estado estable del motor o la corriente de arranque que es de naturaleza transitoria. La corriente de estado estable está fácilmente disponible y puede registrarse desde un motor en funcionamiento en cualquier etapa sin variaciones de carga en el sistema.

Barras del rotor rotas

Aproximadamente en el 10% de los motores [5] se ocasionan fracturas de una o más barras del rotor. El rotor jaula de ardilla de un motor eléctrico de inducción está formado por barras conductoras longitudinales con sus extremos puestos en cortocircuito por medio de dos anillos. Según [9] los fallos relacionados con el rotor corresponden al 10% del total de los fallos, se observa en la Figura 2 a continuación:

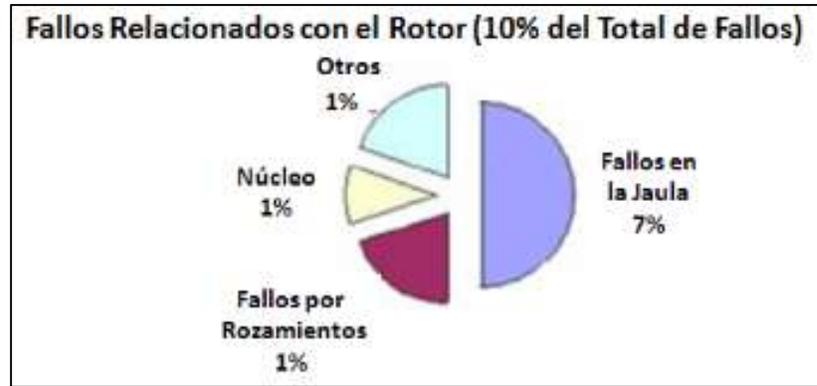


Figura 2. Diagrama de torta MCA. Fuente: [9]

En cuanto a las condiciones en funcionamiento de la máquina, las causas principales de esta falla son los ciclos de trabajo de arranque directo en línea y las cargas mecánicas pulsantes. También pueden ser ocasionadas por defectos de fabricación como ser durante el proceso de soldadura en el ensamblaje de la jaula (ocasiona tensiones metalúrgicas no uniformes); si los anillos de cortocircuito son muy pesados, al girar, los mismos producen grandes fuerzas centrífugas causando tensiones adicionales. Otro factor importante a considerar es el estrés térmico al que puede estar sometido el rotor y la fatiga de metal de la barra de cortocircuito.

Para poder detectar y diagnosticar este tipo de falla se utilizan varias metodologías, algunas de ellas se muestran a continuación.

Transformada de Fourier

Según [3], cualquier asimetría que se genere en el campo magnético rotórico, como ser barras o anillos extremos dañados, modularán en amplitud la corriente. El espectro de la corriente presentará entonces bandas laterales alrededor de la componente fundamental de la corriente, separadas a la frecuencia de paso de polos. La deducción teórica de la componente de firma de falla del rotor inducida en la corriente del estator, explicada a continuación, se toma de [6]. En condiciones saludables del rotor, solo habrá corriente de frecuencia de deslizamiento $s * f_s$ en el rotor. Una barra rota del rotor crea una asimetría en el circuito del rotor que a su vez crea un campo magnético giratorio negativo en la frecuencia de deslizamiento $-s * f_s$ en el rotor. Esta componente de frecuencia de deslizamiento negativo en el rotor crea una componente $f_s * (1 - 2s)$ en el estator. Esto causa un par electromagnético y una oscilación de velocidad al doble de la frecuencia de deslizamiento. Esto da como resultado $f_s * (1 + 2s)$ y otros armónicos en $f_s * (1 \pm 2ks)$ donde “k” es un número entero y “s” el deslizamiento.

Cuando la falla del rotor está presente en la máquina, los componentes de frecuencia de falla de $f_s * (1 \pm 2ks)$ aparecen en la corriente del estator. Sin embargo, la firma de falla más fuerte es $f_s * (1 \pm 2s)$. Las mismas aparecen en el espectro de frecuencias de la corriente del estator como componentes laterales alrededor de la frecuencia de suministro f_s . La magnitud de la banda lateral inferior $f_s * (1 - 2s)$ puede utilizarse como indicador de falla de barra del rotor rota.

La transformada de Fourier convierte una señal en el dominio de la frecuencia desde el dominio del tiempo, o viceversa. Lo mismo se puede realizar mediante la transformada rápida de Fourier (FFT del inglés *Fast Fourier Transform*), la cual realiza dicho proceso con un menor número de cálculos necesarios y permite realizar la transformación rápidamente. Es por ello que es esta última la

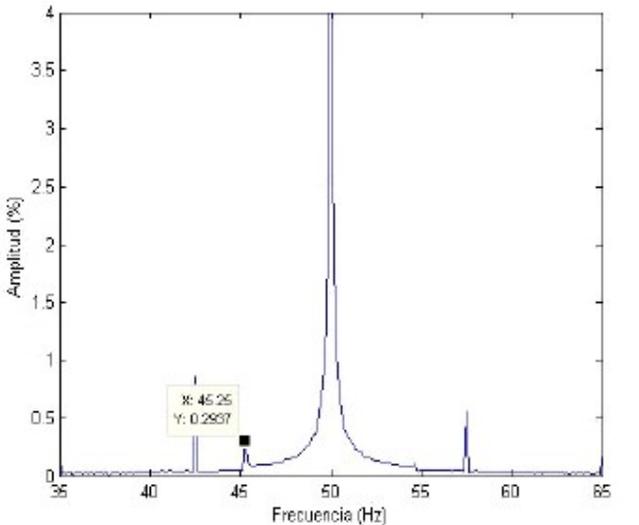
empleada mayormente para la detección de fallas. FFT es un análisis con el motor en funcionamiento en estado estable. Para el análisis mediante este operador matemático, se grafica el eje de ordenadas en escala logarítmica (dB). Esto se realiza para poder percibir de mejor manera el resultado obtenido, ya que la diferencia de amplitud entre el valor correspondiente a la frecuencia fundamental con respecto a las bandas laterales es muy grande.

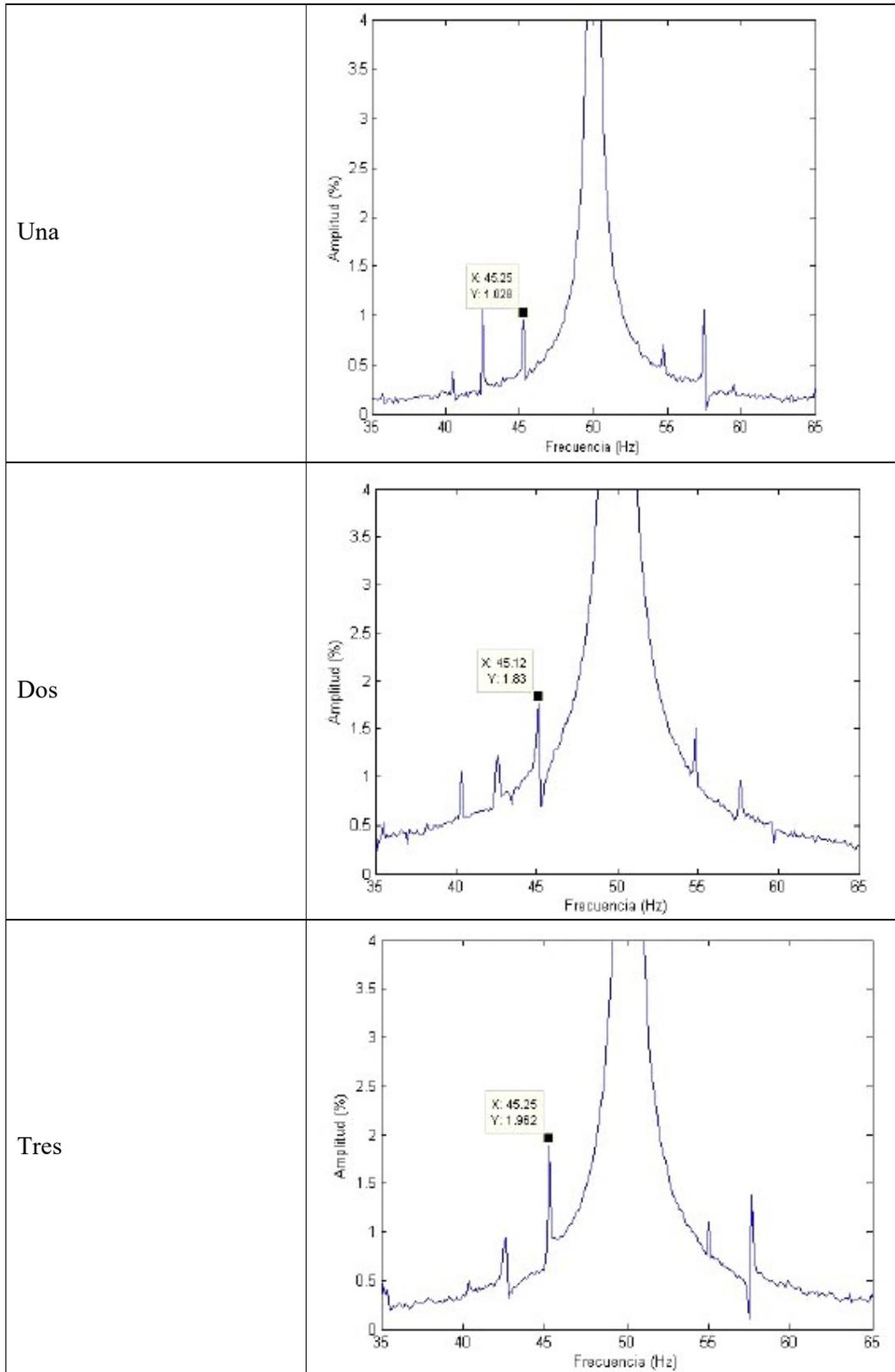
Para diagnosticar éste tipo de falla utilizando la señal de corriente estática en el dominio de la frecuencia, [2] indica que una regla simple es considerar que si la diferencia entre los componentes principal y de banda lateral es mayor que 50 dB, el rotor no tiene fallas, cuando la diferencia está en el rango entre 40 y 50 dB, es probable que haya una barra rota y con una diferencia menor que 40 dB, hay varias barras rotas o anillo final roto.

En [3] se muestra que, si el daño de la barra es muy pequeño o si el porcentaje de la corriente nominal que alimenta al motor está bajo el 50%, incluso existiendo una barra cortada, este método no es capaz de detectar el problema.

A continuación, se presentan en la Tabla 1 los resultados obtenidos en [4] para el ensayo de motores con ninguna, una, dos o tres barras rotas. En cada imagen se observa la frecuencia a la que produce la banda lateral inferior (X) y su amplitud (Y).

Tabla 1. Resultados de ensayos. Fuente: [4]

Cantidad de barras rotas	FFT
Ninguna	 <p>The figure is a Fast Fourier Transform (FFT) plot. The vertical axis is labeled 'Amplitud (%)' and ranges from 0 to 4. The horizontal axis is labeled 'Frecuencia (Hz)' and ranges from 35 to 65. A very sharp and tall peak is centered at 50 Hz, reaching an amplitude of approximately 4. A much smaller peak is visible at 45.25 Hz, with a data label indicating its coordinates: X: 45.25, Y: 0.2937. There are also some very small, barely visible peaks at other frequencies, such as around 58 Hz.</p>



Los estándares existentes para evaluar la severidad del daño en barras mediante el análisis de la corriente, utilizan la diferencia en decibeles entre la amplitud de la componente fundamental de la corriente y su primera banda lateral izquierda. Según la siguiente ecuación:

$$R_b = 20 * \log\left(\frac{F_L}{F_P}\right) \quad (1)$$

Donde:

F_L : Amplitud de la componente de la frecuencia de línea

F_P = Amplitud de la primer banda lateral (inferior)

Diferencias sobre 60 [dB] indican que el estado de las barras es excelente y diferencias menores a 30 [dB] o 40 [dB] indican barras agrietadas o rotas. En la Tabla 2 se muestra una metodología de diagnóstico propuesta.

Tabla 2. Diagnóstico por transformada de Fourier

Diferencia de amplitudes en dB entre el armónico fundamental y el lateral inferior	
$\Delta \geq 49$	Motor sano
$46 < \Delta < 49$	Algún punto de alta resistencia
$44 < \Delta < 46$	Varios puntos de alta resistencia
$39 < \Delta < 44$	Muchos puntos de alta resistencia o una barra rota
$35 < \Delta < 39$	Al menos una barra rota
$\Delta \leq 35$	Varias barras rotas

Como se ha demostrado en [7], la magnitud de la banda lateral alrededor de la fundamental $(1 \pm 2s)f_s$ depende en gran medida del estado de carga y de la inercia del conjunto motor-carga o bien, pueden manifestarse en máquinas sin falla, cuando la carga es oscilante. Por otro lado, en [1] se detallan ciertas limitaciones en el rendimiento de aplicación de la FFT, de manera puntual, la frecuencia de muestreo para la aplicación de FFT debe ser mayor que el doble de la frecuencia más alta de la señal a analizar. Además, la longitud de la ventana de los datos debe ser un múltiplo entero de la frecuencia de la fuente de alimentación. Si estos puntos no se satisfacen, la FFT dará un análisis de frecuencia de forma de onda inexacta, y también puede generar efectos de alias y de fuga. La fuga de frecuencia de la fuente de alimentación significa que la frecuencia de la fuente puede enmascarar completamente los componentes de frecuencia de las características del motor estudiado, especialmente si el motor estudiado es de tamaño pequeño o mediano y funciona con poca carga o sin carga. En el caso de una falla en la barra, las frecuencias características del motor generadas están muy cerca de la frecuencia fundamental y sus amplitudes también son muy pequeñas en comparación con la fundamental. Por lo tanto, la detección de fallas y la determinación de la severidad de fallas bajo carga liviana no es posible de diagnosticar, especialmente para motores pequeños. Otra limitación sería de la FFT es que no es apropiada para la señal cuya característica cambia con el tiempo. Esto se debe a que, al transformarse al dominio de frecuencia, la información de tiempo se pierde, por lo tanto, la localización de componentes de frecuencia de transformación FFT en cualquier

espectro no es posible. Por esta razón, en el análisis de la corriente de arranque de un motor de arranque directo en línea (DOL), la FFT es inapropiada, ya que esta corriente es de naturaleza transitoria.

Transformada Wavelet (WT)

Según [8], la detección de fallas de rotor en máquinas de inducción se puede realizar mediante el análisis de la corriente de arranque utilizando una técnica de cuantificación desarrollada recientemente basada en la transformada wavelet. La cual descompone una señal en una familia de ondas de diferente frecuencia y amplitud (wavelets), proporcionando una representación de la señal en el tiempo y la frecuencia.

La técnica de análisis aplica la transformada wavelet a la envolvente de la corriente de arranque. La extracción de la envolvente se utiliza para eliminar el componente fundamental fuerte, que eclipsa las diferencias características entre un motor en buen estado y un motor defectuoso con barras rota, como se demuestra en [8].

La forma de eliminar la componente fundamental de la señal de corriente de arranque y obtener las características transitorias es mediante la extracción de la envolvente de la señal. Para ello, en [1] se propone utilizar la transformada Hilbert.

En la Figura 3 se muestra que una señal transitoria está compuesta por la multiplicación entre la componente fundamental de la señal y la envolvente de la señal transitoria.

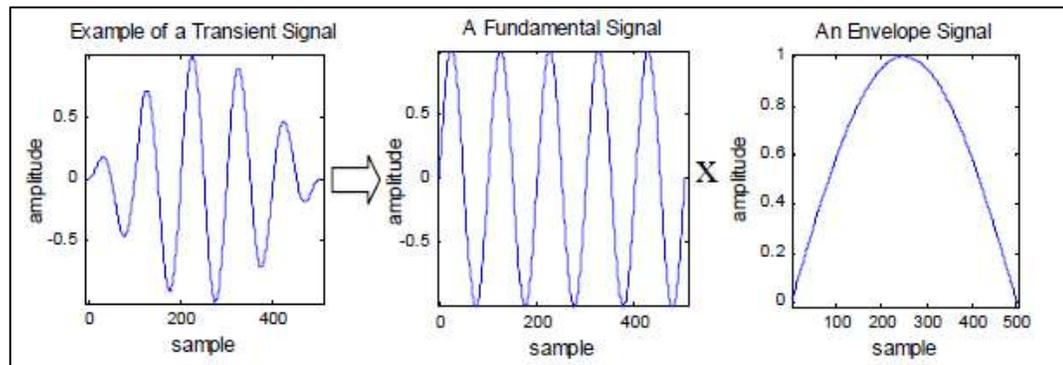
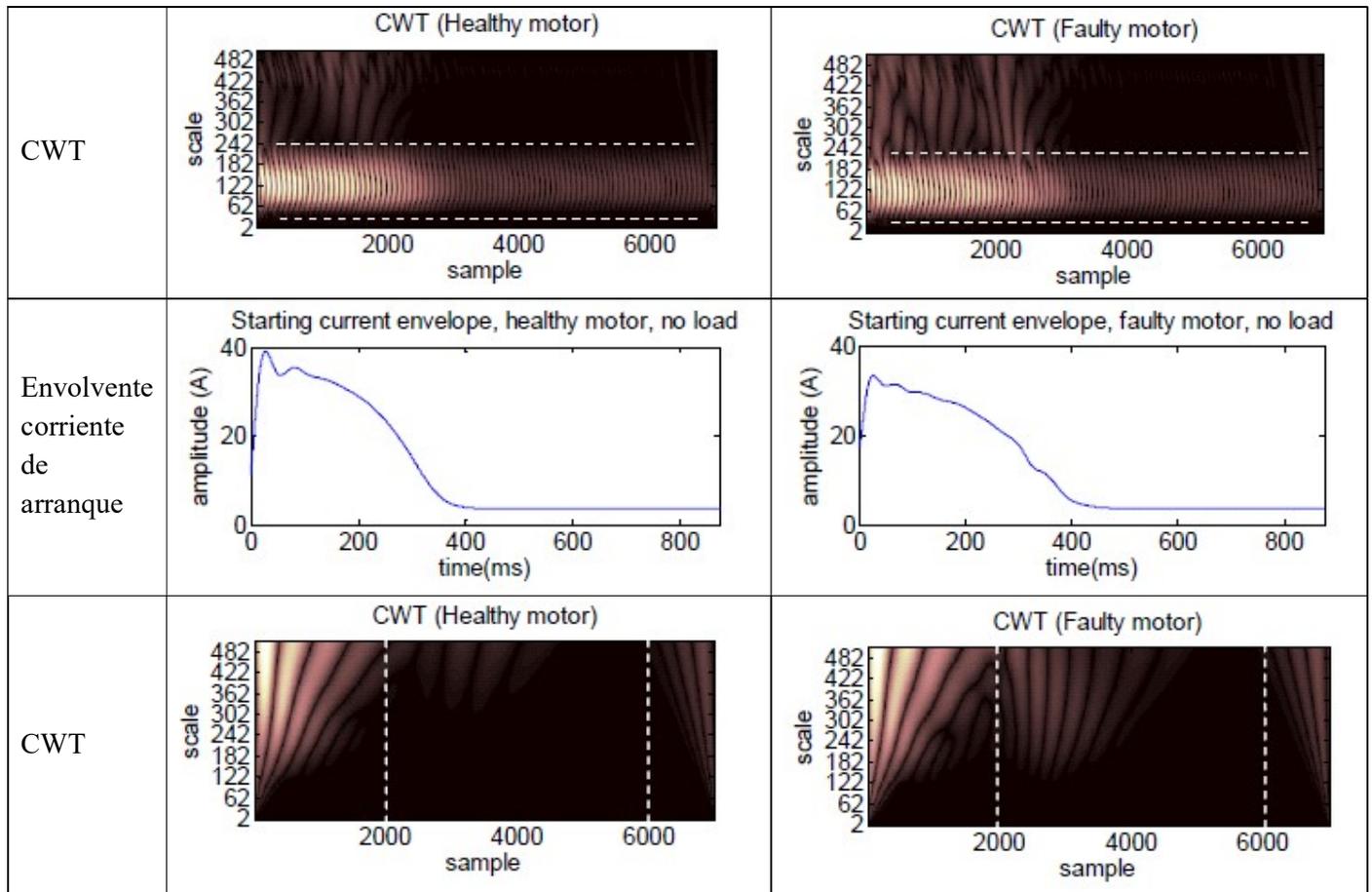


Figura 3. Composición de la señal. Fuente: [8]

En la Tabla 3 se muestra la comparación de aplicar la transformada wavelet a la corriente de arranque o a su envolvente, tanto para un motor con falla como para un motor saludable. Las gráficas son obtenidas de [8].

Tabla 3. Comparación de motor sano vs motor con falla. Fuente: [8]

	Motor sano	Motor con barra dañada
Corriente de arranque		



Los espectros de amplitud que se utilizan para la detección de la barra del rotor rota pertenecen a la parte de baja frecuencia de la señal de corriente del motor, es por ello que la amplitud de la señal debe filtrarse en la zona de banda estrecha (por debajo de la frecuencia de alimentación). Para esto se utiliza la wavelet de orden superior, este método de usar la transformada de Hilbert junto con DWT presenta un método excelente para la detección de fallas de barras rotas utilizando una corriente de arranque transitoria, que identifica la oscilación de baja frecuencia.

En la presente revisión bibliográfica, la explicación del método de análisis mediante la transformada wavelet se toma de [1] y se detalla a continuación.

En primer lugar, se obtienen las envolventes de señal, éstas son el valor absoluto de la señal analítica obtenida al realizar la transformada de Hilbert (HT) de la firma original. Las envolventes de señal se descomponen en coeficientes detallados y aproximados a través de DWT utilizando "db10" de la familia Daubechies hasta el nivel de wavelet 10. Cada detalle se reconstruye.

El objetivo es extraer los armónicos del lado inferior por debajo de 50 Hz para los cuales se utiliza la onda superior de orden "db10" en los niveles superiores 8, 9 y 10. Se estiman los parámetros estadísticos, es decir, la media y la desviación estándar de los coeficientes detallados absolutos reconstruidos de las señales de corriente de arranque y sus respectivas envolventes de señal para ambos motores sin carga y carga parcial. Estos son considerados como parámetros de falla. De la Tabla 4, se observa que estos valores en el séptimo nivel para la señal original son mucho más altos que los valores correspondientes para la envolvente de la señal, lo que garantiza que la frecuencia de la alimentación no esté presente en las envolventes de la señal. Esto hace que la detección sea más

fácil y más limpia, ya que los armónicos laterales inferiores están libres del efecto de fuga espectral de 50 Hz. El DWT de las señales originales se basa en la frecuencia sinusoidal de Fourier, mientras que el DWT de las envolventes de señal funciona en el concepto de frecuencia de oscilación instantánea. En comparación con la señal original, el análisis de envolvente proporciona una mejor capacidad de detección, lo cual se observa en las

Figura 4,

Figura 5,

Figura 6 y Figura 7.

Tabla 4. Parámetros estadísticos de la señal y su envolvente. Fuente:[1]

Table 4.6 Statistical parameters of absolute reconstructed details of motor current signal

Load condition	Motor condition	Mean of absolute signal at wavelet level				Standard deviation of absolute signal at wavelet level			
		7	8	9	10	7	8	9	10
No load	Healthy	2.973	0.2106	0.07209	0.03979	3.686	0.5152	0.07774	0.03629
	Faulty	2.821	0.2577	0.1469	0.1272	3.632	0.3432	0.1746	0.07431
Partial load	Healthy	5.485	0.03797	0.03507	0.01162	4.302	0.1446	0.05344	0.02548
	Faulty	5.3	0.0846	0.03208	0.01276	4.249	0.1484	0.04345	0.02636

Table 4.7 Statistical parameters of absolute reconstructed details of motor current signal envelope

Load condition	Motor condition	Mean of absolute signal envelope at wavelet level				Standard deviation of absolute signal envelope at wavelet level			
		7	8	9	10	7	8	9	10
No load	Healthy	0.07287	0.271	0.4057	1.14	0.1616	0.5472	0.5051	1.158
	Faulty	0.1982	0.2883	0.5345	1.226	0.3199	0.6174	0.8693	1.186
Partial load	Healthy	0.03936	0.06242	0.0603	0.2097	0.08933	0.2903	0.2361	0.6743
	Faulty	0.06831	0.1219	0.09776	0.2019	0.1075	0.3018	0.2495	0.6459

Las curvas que representan los parámetros estadísticos (media y desviación estándar) de los coeficientes detallados absolutos reconstruidos de la señal original se encuentran debajo de las curvas que representan los parámetros correspondientes a las envolventes de la señal, excepto en el 8° nivel de wavelet; la única media correspondiente a la señal original para el motor defectuoso bajo carga parcial es un valor más alto que la media correspondiente a la envolvente de señal del motor en buen estado, pero aun así su valor es menor que la media correspondiente a la envolvente de señal del motor defectuoso. Esto confirma que los parámetros de falla correspondientes a la frecuencia de oscilación instantánea de las envolventes de señal tienen una magnitud mayor que la de la señal original, lo que resulta en una mayor capacidad de detección y una mejor representación de la corriente de arranque no estacionaria de los motores sin carga y carga parcial. La envolvente de señal sin carga produce valores más altos de la media estadística y la desviación estándar de los detalles absolutos reconstruidos para el motor defectuoso en los niveles de wavelet 8, 9 y 10 que los del motor en buen estado. El noveno nivel indica un cambio mucho mayor del parámetro respectivo para el motor defectuoso que para el motor en buen estado sin carga. La envolvente de señal en carga parcial da valores más altos de parámetros estadísticos (Media y desviación estándar) de detalles absolutos reconstruidos para motores defectuosos en los niveles 8 y 9, pero menos valor en el nivel 10 que aquellos para el motor en buen estado. Por lo tanto, se observa que el noveno nivel es más sensible para detectar la falla de barra del rotor rota, tanto en carga parcial como sin carga. Por lo tanto, los

armónicos del lado inferior por debajo de 50 Hz extraídos de las envolventes de señal son los más efectivos para la detección de la falla de barra rota del rotor.

Se puede inferir de las observaciones discutidas anteriormente que el análisis de envolvente basado en la frecuencia instantánea proporciona una mejor descripción de la corriente de arranque transitoria del motor a través de la transformada de Hilbert y la transformada de wavelet para la detección de la falla de la barra rota del rotor en un motor de inducción.

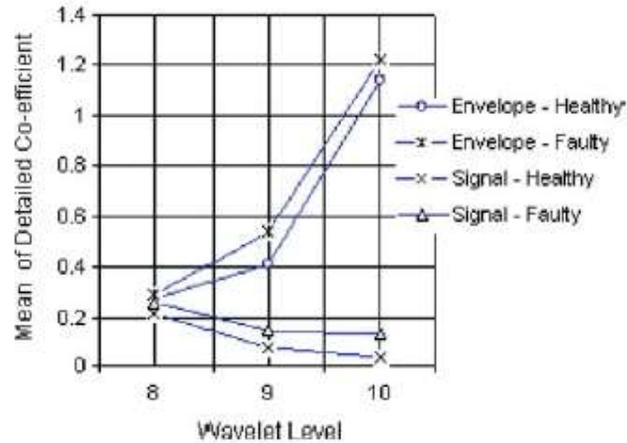


Fig. 4.18 Mean of reconstructed details of stator current at no load

Figura 4. Media, sin carga [1]

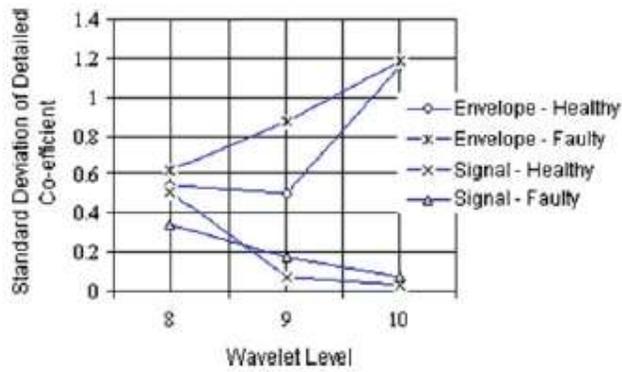


Fig. 4.19 Standard deviation of reconstructed details of stator current at no load

Figura 5 - Desviación estándar, sin carga [1]

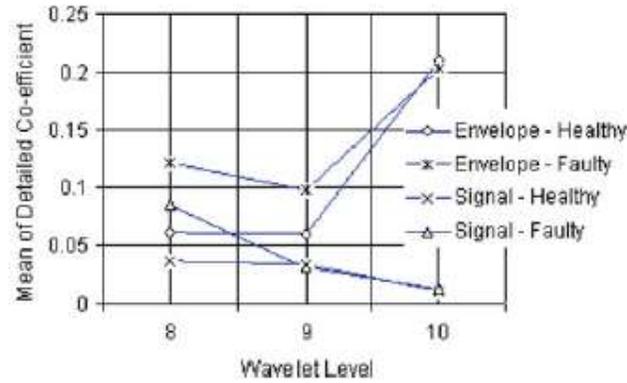


Fig. 4.20 Mean of reconstructed details of stator current at partial load

Figura 6. Media, carga parcial [1]

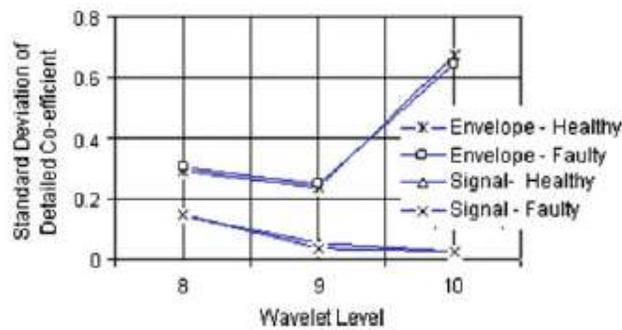


Fig. 4.21 Standard deviation of reconstructed details of stator current at partial load

Figura 7. Desviación estándar, carga parcial [1]

Bibliografía

- [1] Karmakar, S., Mitra, M., Chattopadhyay, S., & Sengupta, S. (2016). *Induction Motor Fault Diagnosis*. Singapore: Springer.
- [2] MILJKOVIĆ, D y HEP, Z. Brief review of motors current signature analysis. Croatia.
- [3] Talbot C, Saavedra P N y Valenzuela M A, Diagnóstico de la condición de las barras de motores de inducción. (2013). Chile.
- [4] Castelli M, Fossati J P y Andrade M. Metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos de inducción.
- [5] Valles Novo R I. Detección de barras rotas en motores de inducción tipo jaula de ardilla por medio de MCSA y EMD. (2014). México.
- [6] Ostojic P., Banerjee A., Patel D., Basu W., Ali S., Smith T. Advanced motor monitoring and diagnostics. (2014)
- [7] Bossio G M, De Angelo C H y García Guillermo O. *Evaluación de los armónicos de corriente para el diagnóstico de barras rotas en motores de inducción*. Rio Cuarto, Córdoba, Argentina. AADECA 2008
- [8] Supangat R, Ertugrul N, Soong W L, Gray D A, Hansen C y Grieger J. *Broken rotor bar fault detection in induction motors using starting current analysis*. University of Adelaide. Australia 2014.

- [9] Puche Panadero R, *Nuevos métodos de diagnosis de excentricidad y otras asimetrías rotóricas en máquinas eléctricas de inducción a través del análisis de la corriente estatórica*. Universidad politécnica de Valencia. 2008.