

## DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN MOTORES DE INDUCCIÓN MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE CORRIENTE (MCSA).

Luis Alonso Trujillo Guajardo  
Paz Vicente Cantú Gutiérrez

### RESUMEN.

En este trabajo se describen las fallas típicas en motores de inducción que pueden ser detectadas mediante el análisis espectral de las señales de corriente. Primero, se presentan las consideraciones básicas del muestreo de señales para obtener el espectro de frecuencias de la señal de corriente, así como algunos casos en los que el espectro calculado no es correcto y la información obtenida no es confiable. Posteriormente, se describen los tipos de falla y sus frecuencias características, las cuales pueden ser detectadas utilizando la señal de corriente del estator, donde se le aplica la transformada rápida de Fourier (FFT) para así poder determinar el tipo y severidad de la falla.

### PALABRAS CLAVE.

Motores de Inducción, análisis espectral, FFT.

### INTRODUCCIÓN.

Desde los primeros días de la puesta en marcha de motores eléctricos para su uso en distintas aplicaciones, es bien conocido que el sector industrial utiliza más motores de inducción trifásicos que otros tipos de motores, ya que requieren menos mantenimiento, la cual es una de las principales ventajas de utilizar este tipo de máquina eléctrica. Sin embargo, un problema muy común en motor de inducción es la falla debido a fractura en barras del rotor (BRBF), lo que representa más del 5% de todas las fallas de un motor eléctrico de inducción de rotor jaula de ardilla [1]. La mayoría de las barras de rotor de un motor de jaula de ardilla y los anillos de los extremos están hechos de aleaciones de aluminio- cobre o solo de cobre [1]. De acuerdo a los estudios estadísticos de IEEE (Institute of Electric and Electronics Engineers) y EPRI (Electric Power Research Institute), la probabilidad de que ocurra una falla en el rotor en los motores de inducción es de 8 y 9% respectivamente [2]. Es importante mencionar, que una barra de rotor fracturada (BRB) se puede considerar como una asimetría en el rotor (variación del flujo magnético) que provoca corrientes de línea no balanceadas, pulsaciones de par, y la disminución del par promedio [1], estos efectos pueden provocar una falla de aislamiento debido al incremento de la corriente nominal dejando al motor fuera de servicio.

La tecnología de análisis de las características de la señal de corriente del motor (MCSA) ha sido utilizada durante muchos años para ayudar a diagnosticar problemas como la BRBF, desalineación del eje, la excentricidad, desbalance mecánico, etc [3,4]. Estos problemas dan lugar a la asimetría magnética en el entrehierro del rotor, lo cual produce determinadas componentes frecuenciales en la señal de corriente medida en terminales del motor (Corriente de estator). Una técnica muy conocida y utilizada en diferentes equipos de diagnóstico es la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para la detección de las frecuencias y sus correspondientes amplitudes de la señal de corriente del estator [4].

**JUSTIFICACIÓN.**

El presente trabajo aborda las recomendaciones para obtener un espectro de frecuencia mediante FFT de la señal de corriente, así como la caracterización de los principales problemas que se presentan durante el diagnóstico de fallas mediante el análisis de la señal de corriente (MCSA), esto con el objetivo de poder emitir un diagnóstico más adecuado de la condición operativa de los motores de inducción. También se presenta la clasificación de las fallas típicas en motores de inducción y sus frecuencias características, las cuales pueden ser detectadas mediante el MCSA.

**METODOLOGÍA**

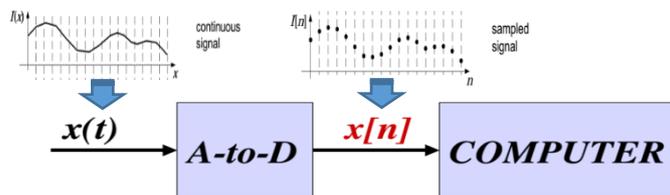
**Consideraciones básicas para el MCSA.**

**Resolución de señal.**

Para poder determinar un diagnóstico operativo adecuado de un motor de inducción mediante el MCSA, para obtener su espectro de frecuencias, es necesario tomar en cuenta el teorema de Nyquist como se muestra en (1), este también conocido como el teorema de muestreo, es un teorema utilizado para la digitalización de señales analógicas [5-7].

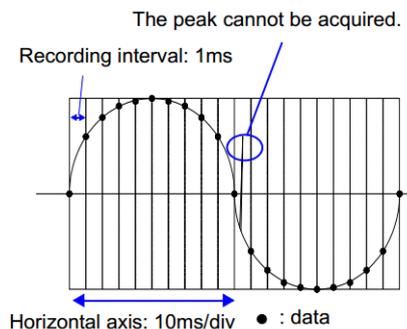
$$f_{nyquist} = \frac{f_s}{2}$$

Este teorema es utilizado con el fin de tener una señal digital lo más parecida posible a la señal real durante la conversión analógica digital, ver Figura 1.



**Figura 1. Esquema de procesamiento de la señal analizada.**

Si la frecuencia de muestreo (resolución de la señal) no es la adecuada [6], se perderá resolución y la información extraída en el espectro de frecuencia será inexacta. En la Fig 2 tenemos una señal digitalizada con baja resolución, lo cual provoca que las altas frecuencias no sean vistas por la FFT.



**Figura 2. Señal con resolución inadecuada.**

**Transformada rápida de Fourier.**

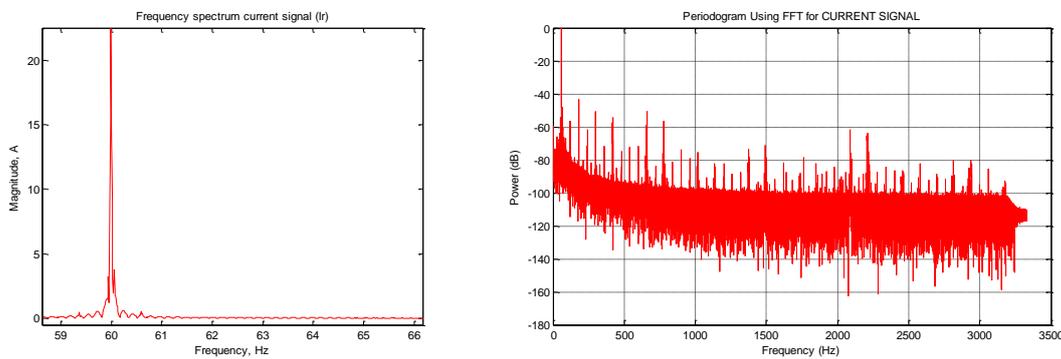
El espectro frecuencial de una señal se obtiene calculando la transformada de fourier discreta de (2), en donde se obtiene la amplitud y ángulo correspondiente para cada frecuencia que está presente en la señal analizada \$x(j)\$, como se muestra en Figura 3. [7].

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)}$$

$$\omega_N = e^{(-2\pi i)/N}$$
(2)

La densidad espectral ( $S_{kxx}$ ) en Fig. 3 es obtenida mediante la transformada discreta de fourier de la señal de auto correlación, y la cual es calculada mediante (3).

$$S_{kxx}(f) = \frac{1}{N} |X_k(f)|^2$$
(3)



**Figura 3. Espectro en frecuencia lineal y densidad espectral en dB calculados de una señal de corriente.**

Es importante mencionar que dependiendo de la resolución de la señal y el tiempo de duración así como la característica en estado estable de la señal analizada, todos estos factores influyen en la exactitud de las amplitudes y frecuencias calculadas por la FFT, las cuales son visualizadas en las gráficas de densidad espectral y/o el espectro de frecuencias como se observa en la Figura 3.

### **Clasificación de frecuencias características por tipo de falla.**

A continuación se presentan las fallas típicas en motores de inducción que pueden ser detectadas analizando la señal de corriente de estator.

#### **A. Falla en barras de rotor**

Este tipo de falla causa variaciones en la señal del torque y velocidad, si una o más barras se fracturan las corrientes en la jaula se incrementarían provocando así un daño en el núcleo del rotor [2]. La ecuación para detectar la frecuencia de falla en barras de rotor es la siguiente (4):

$$f_{brb} = (1 \pm 2 * h * s) * f_0$$
(4)

Donde

$f_{brb}$  = componentes de frecuencia de la señal de corriente con fractura en barras de rotor.

$f_0$  = frecuencia de la fuente de alimentación (Hz)

$h$  = orden armónico de las frecuencias de bandas laterales.

$s$  = deslizamiento de operación (por unidad)

Es importante mencionar que este tipo de falla solo podrá ser detectada bajo condiciones de carga del motor, debido a que en condiciones de vacío la corriente inducida en el rotor se aproxima a un valor de cero [1-4]. Los niveles de falla en barras de rotor para determinar el grado de severidad se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Niveles de falla en barras de rotor.**

- dB	Rotor Condition Assessment	Recommended Action
> 60	Excellent	None
54 – 60	Good	None
48 – 54	Moderate	Trend Condition
42 – 48	High Resistant Connection or Cracked Bars	Increase Test Frequency and Trend
36 – 42	Broken Rotor Bars Will Show in Vibration	Confirm with Vibration, Plan Repair / Replace
30 – 36	Multiple Cracked/Broken Bars, Poss Slip Ring Problems	Repair/Replace ASAP
<30	Severe Rotor Faults	Repair/Replace Immediately

**B. Movimiento de devanados**

Cuando existe un exceso de movimiento en los devanados de estator, este típicamente ocurre al no contar con un buen barnizado del estator por alguna deficiencia durante el proceso de impregnación de barniz [2-4]. Este movimiento puede causar fracturas en las bobinas, las cuales debido al exceso de movimiento, pueden desencadenar en una falla a tierra, o en su caso una falla mecánica, dejando fuera de operación al motor. Para detectar la frecuencia característica del movimiento en devanados en el espectro de corriente es necesario conocer el número de ranuras de estator de la máquina a evaluar utilizando (5) es posible calcular el número de ranuras del estator [4].

$$\# \text{Ranuras est} = \# \text{Polos} \times \# \text{Fases} \tag{5}$$

Sin embargo, para máquinas de 2 a 6 polos 36 ranuras corresponden a máquinas de 25HP, por lo que se considera iniciar con un valor de 36 ranuras, 48, 60,72, 84, 96, etc, para poder determinar la frecuencia característica que determina un movimiento de devanados en el motor, y la cual la ecuación (6) representa estas frecuencias [4].

$$F_{\text{Mbobina}} = [\# \text{Ranuras estator} \times \text{Vel.mecanica (Hz)}] \pm F_{\text{Linea}} \tag{6}$$

**C. Excentricidad estática**

Las fallas por excentricidad ocurren por diferentes factores como fatiga en rodamientos, el núcleo del estator tiene forma elíptica, mala colocación del rotor o estator durante un mantenimiento, ubicación incorrecta de un rodamiento, deflexión de la flecha, e imperfecciones en los ajustes de la fecha y peso excesivo del rotor. Esto puede provocar fallas drásticas en el núcleo de estator, rotor y en devanados [4].

Para detectar la frecuencia característica de falla por excentricidad estática en el espectro de corriente es necesario conocer el número de ranuras de rotor de la máquina a evaluar, así como

la velocidad mecánica en Hz del motor a analizar y la frecuencia de la fuente de alimentación ( $F_{Linea}$ ), en caso de existir armónicos de estas frecuencias serán del orden N, como se muestra en (7).

$$F_{Excent.Estática} = [\# Barras de Rotor \times Vel.mecánica (Hz)] \pm N * F_{Linea}$$

$$N = 1, 3, 5, 7 \dots$$
(7)

**D. Excentricidad dinámica**

En la excentricidad dinámica, la longitud mínima del entrehierro depende de la posición angular del rotor, y esta gira alrededor del rotor. Esto ocurre debido al desalineamiento o curvatura del eje del rotor [1-4]. Para detectar la frecuencia característica por excentricidad dinámica en el espectro de corriente esta se calculará como en (7), sin embargo existirán frecuencias de bandas laterales, y se obtienen de (8).

$$F_{Excent.Dinámica} = [\# Barras de Rotor \times Vel.mecánica (Hz)] \pm N * F_{Linea}$$

$$N = 1, 3, 5, 7 \dots$$

$$F_{Excent.Dinámica (Bandaslaterales)} = F_{Excent.Dinámica} \pm Vel.mecánica (Hz)$$
(8)

**E. Desbalance mecánico y desalineamiento**

En el caso de desbalance mecánico y desalineamiento, solo se consideran el 2 y 4to armónico de la frecuencia de la fuente de alimentación [4], y se suman y/o restan a la frecuencia calculada de desbalance mecánico y desalineamiento para obtener el patrón de frecuencias para este tipo de falla como se muestra en (9).

$$F_{Desbalance Mec} = [\# Barras de Rotor \times Vel.mecánica (Hz)] \pm F_{Linea}$$

*Patrón de Frecuencias*

$$F_{Desbalance Mec1} = F_{Desbalance Mec} \pm 4 * F_{Linea}$$

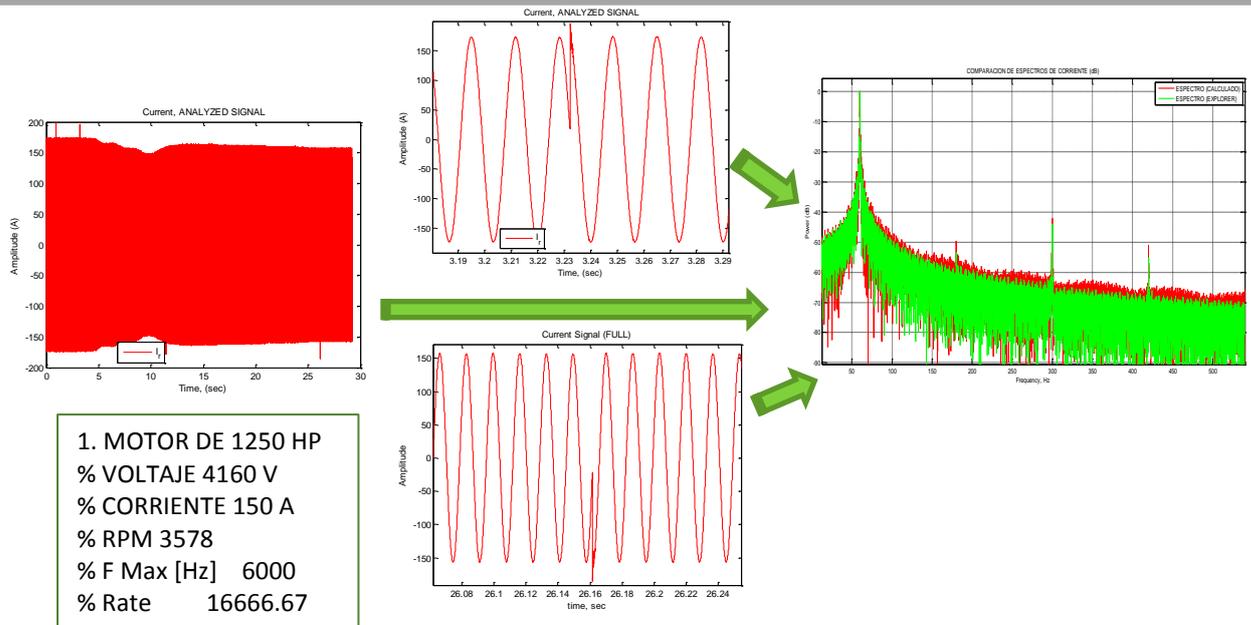
$$F_{Desbalance Mec2} = F_{Desbalance Mec1} \pm 2 * F_{Linea}$$
(9)

**RESULTADOS.**

En esta sección se presentan tres casos de análisis para la detección de fallas en barras de rotor principalmente, en particular estos casos que se presentan son muy comunes en la industria, y es complicado poder determinar el diagnóstico de las condiciones del rotor de los motores de inducción ante estas condiciones operativas de las máquinas, por lo que es importante que sea caracterizada esta problemática con el fin de poder plantear una solución o herramienta adecuada para estos casos en particular.

**Caso # 1. Motor 4160V 1250HP Falla en barras de rotor no detectada.**

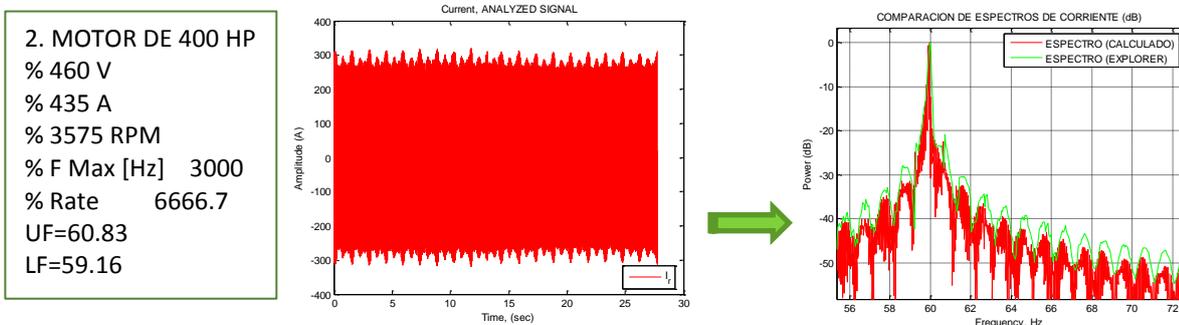
En la Figura 4, se analiza la señal de corriente de un motor de inducción de 4160V y 1250HP, el cual presentaba problemas de oscilación en el torque, lo cual era un indicativo de una probable falla en barras de rotor. La señal de corriente analizada tiene una duración de 29 seg y una frecuencia de muestreo de 16666.67 muestras por segundo. Es posible apreciar que la señal no es estable, por lo que al obtener la densidad espectral utilizando la FFT como se mencionó en la sección 3, las frecuencias que indican una condición de falla en barras de rotor no son detectadas.



**Fig. 4. Señal de corriente en fase A (no en estado estable) y densidad espectral de la señal en decibeles.**

**Caso # 2. Motor 460V 400HP Falla en barras de rotor no detectada (En vacío).**

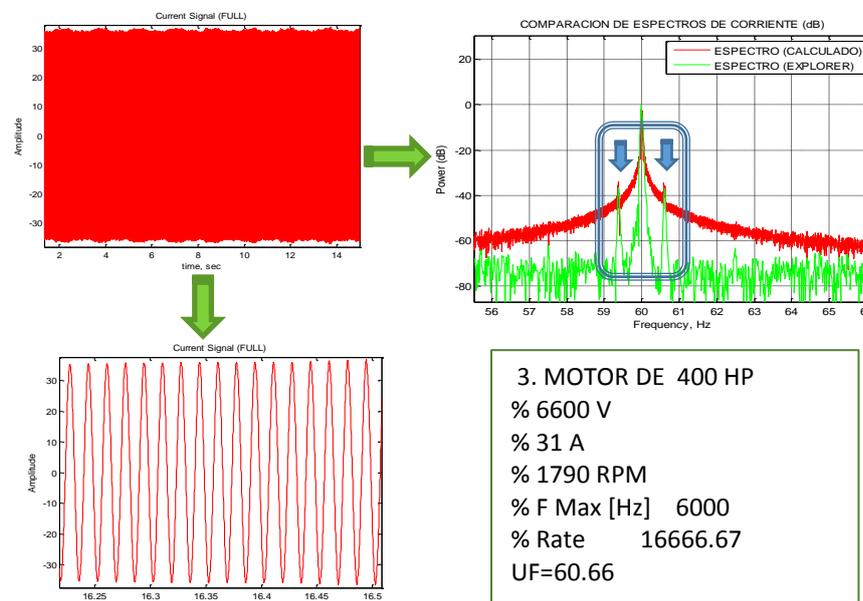
En el presente caso, la máquina analizada se encuentra en condiciones de vacío (50% de la corriente nominal) como se observa en la Figura 5. Se analiza la señal de corriente de un motor de inducción de 460V y 400HP, el cual presentaba de igual manera que el caso 1 problemas de oscilación en el torque, lo cual era un indicativo de una probable falla en barras de rotor. La señal de corriente analizada tiene una duración de 28 seg y una frecuencia de muestreo de 6666.7 muestras por segundo. Es posible apreciar que la señal es estable, por lo que al obtener la densidad espectral se obtienen las frecuencias y amplitudes con el error mínimo, las cuales representan la señal. Sin embargo, se analizó operando en vacío por lo que en el espectro de la señal de corriente no son detectadas las frecuencias de barras de rotor, las cuales al calcular con (4) se obtienen los valores 60.83 y 59.16 Hz, estas frecuencias no están presentes en el espectro de la Figura 5.



**Figura 5. Señal de corriente en fase A (en vacío) y densidad espectral de la señal en decibeles.**

**Caso # 3. Motor 6600V 400HP Falla en barras de rotor detectada (Plena Carga).**

En el presente caso, la máquina analizada se encuentra en condiciones de carga (95% de la corriente nominal) como se observa en la Figura 6. Se analiza un motor de inducción de 6600V y 400HP, el cual presentaba de igual manera que el caso 1 y 2 problemas de oscilación en el torque y durante el arranque, lo cual era un indicativo de una probable falla en barras de rotor. Es posible apreciar que la señal es estable, por lo que al obtener la densidad espectral se obtienen las frecuencias y amplitudes con el error mínimo, las cuales representan la señal. Sin embargo, en comparación con los dos casos anteriores, esta máquina se analizó operando a plena carga por lo que al analizar el espectro de la señal de corriente las frecuencias de barras de rotor son detectadas, las cuales al calcular con (4) se obtienen los valores 60.66 y 59.33 Hz, estas frecuencias se observan en el espectro de la Figura 6.



**Figura 6. Señal de corriente en fase A (plena carga) y densidad espectral de la señal en decibeles.**

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

Del análisis presentado en este trabajo, se caracterizaron las diferentes condiciones en las cuales no es posible detectar una falla en barras de rotor, ya que al realizar los análisis para las distintas condiciones tanto de operación como de resolución de señal, se pudo observar que la falla de barra de rotor no es detectada fácilmente, ya que es necesario que la máquina se encuentre en condiciones nominales de operación y que no existan fluctuaciones en la carga que puedan afectar el cálculo de las frecuencias y amplitudes, por lo que actualmente se está trabajando en este tópico para detectar de manera más eficiente y con menos longitud de señal este tipo de falla, ya que debido a su naturaleza, se requiere de una longitud de señal considerable.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Electric Machines, Modeling, Condition Monitoring and Fault diagnosis, Hamid A. Toliyat, CRC Press 2013.
- [2] Induction Motor Fault Diagnosis Approach through Current Signature Analysis, Subrata Karmakar, Surajit Chattopadhyay, Madhuchhanda Mitra, Samarjit Sengupta, Springer, First edition, 2016.
- [3] Electric Motor Maintenance and Troubleshooting, Augie Hand, McGraw-Hill, Second Edition, 2011.
- [4] Electrical Motor Diagnostics, Howard W. Penrose, Success by Design Publishing, Second Edition, 2008.
- [5] Digital Signal Processing Using MATLAB and Wavelets, Michael Weeks, Georgia State University, Infinity Science press LLC, 2007.
- [6] Aliasing, Bruno A. Olshausen, PSC 129 - Sensory Processes, October 10, 2000.
- [7] Digital Signal Processing, J.G. Proakis, Manolakis, Prentice Hall; 4 edition (April 7, 2006).