

## DetECCIÓN DE BARRAS ROTAS UTILIZANDO STFT Y FUNCIONES VENTANA

Rubi A. Ayon Sicaeros, Eduardo Cabal-Yepez, Member, IEEE, Luis M. Ledesma-Carrillo, Member IEEE, Giovanni Hernandez-Gomez, Misael Lopez-Ramirez, Carlos Rodriguez-Donate

*Departamento de Estudios Multidisciplinarios, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. Avenida Universidad SN, Colonia Yacatitas, Yuriria, Guanajuato, C.P.: 38944Méx.  
(Tel: +52 (445) 4589040; e-mail: e.cabalyepez@gmail.com).*

---

**Abstract:** Una de las técnicas más populares para el análisis de señales adquiridas en aplicaciones industriales es transformada de Fourier (FT). La FT resulta insuficiente para ver las características evolutivas de la señal, sin embargo, esto se logra mediante la técnica de representación tiempo-frecuencia Short-Time Fourier Transform (STFT). En este documento se presenta un método basado en la Short-Time Fourier Transform y Funciones Ventana para la detección de barras rotas en motores de inducción mediante MATLAB. Las Funciones Ventana permiten una mejor resolución en la visualización del comportamiento de las frecuencias características de las fallas, ya que reducen la fuga espectral. Por ello, se propone una técnica basada en la STFT y Funciones Ventana: Hamming, Gaussiana y Kaiser, para resaltar el comportamiento característico de las componentes frecuenciales inducidas por la presencia de barras rotas.

**Keywords:** Función Ventana, ventana Gaussiana, ventana Hamming, ventana Kaiser, motor de inducción, transformada corta de Fourier (STFT)

---

### 1. INTRODUCCIÓN

Dentro del sector industrial, los motores de inducción son de gran relevancia debido a su alto rendimiento, robustez y bajo costo en construcción y mantenimiento, además de su versatilidad y resiliencia para trabajos adversos. Por esta razón, el estrés al que se ven sometidos genera fallas que afectan su óptima operación, lo cual se refleja en su alto consumo energético, así como en aspectos mecánicos, eficiencia y, por tanto, económicos. Por ello, los sistemas de monitoreo para la prevención de fallas han tomado gran relevancia para la industria, ya que éstas producen interrupciones inesperadas en la producción con severas consecuencias en costo, calidad del producto y seguridad (Cabal-Yepez, Eduardo, Garcia-Ramirez, Armando G., Romero-Troncoso, Rene J., Garcia-Perez, Arturo, Osornio-Rios, Roque A., 2013).

Dentro de las técnicas utilizadas para el monitoreo de la condición de operación de un motor eléctrico, aquellas que utilizan las señales de voltaje y corriente son las más comunes. A partir de estas señales, es posible obtener información relevante respecto a las características del sistema analizado como la amplitud de la señal, frecuencia, contenido armónico, fase, entre otros (Romero-Troncoso, Rene J., Cabal-Yepez, Eduardo, Garcia-Perez, Arturo, Alvarez-Salas, Ricardo, Granados-Lieberman, David.). Una de las técnicas más populares es la transformada de Fourier (FT) (Cabal-Yepez, et al., 2013); sin embargo, resulta insuficiente para ver las características evolutivas de la señal. Por otro lado, la técnica de representación tiempo-frecuencia Short-Time

Fourier Transform (STFT), puede ser utilizada con este objetivo. Por ejemplo, en (Tarek Ameid, Menacer Arezki, Hicham Talhaoui, Imadeddine Harzelli, 2017), se utiliza la FFT para el diagnóstico de barras rotas en el rotor aplicada a una máquina de inducción. En (George Georgoulas, Petros Karvelis, Chysostomos D. Stylios, Ioannis P. Tsoumas, Jose Alfonso Antonino-Daviu, Vicente Climente-Alarcon, 2014), se presenta un enfoque automatizado para detectar barras rotas en máquinas de inducción utilizando la STFT. En (Danilo Granda, Diego Arcos-Aviles, Danny Sotomayor, 2018), se presenta un Análisis de las Técnicas de Procesamiento de Señal comúnmente utilizadas para la Detección de Barras Rotas en Motores de Inducción, determinando que a través de otros métodos se pueden tener mejores resultados. En el caso de la STFT, la resolución en tiempo y frecuencia depende del tamaño de la ventana utilizada, comprometiendo así, la resolución misma (Ojeda Aguirre, Noe A., Camarena-Martinez, David, Garcia-Perez, Arturo, Romero-Troncoso, Rene J., Valtierra-Rodriguez, Martin, Amezquita-Sanchez, Juan P., 2017).

Debido a que las Funciones Ventana permiten una mejor visualización de las barras rotas, ya que disminuyen la fuga espectral. En este trabajo, mediante el Procesamiento Digital de Señales (DSP), se propone la combinación de la técnica de representación tiempo-frecuencia STFT y Funciones Ventana (Hamming, Gaussiana y Kaiser) para la detección de barras rotas en un motor de inducción, analizando la señal de corriente durante el transitorio de arranque.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Motor Current Signature Analysis (MCSA)

MCSA es una técnica de monitoreo para diagnosticar posibles fallas en motores de inducción donde la señal de corriente es detectada por un sensor de corriente (clamp probe, current transformer) con derivación resistiva a través de su salida y es registrada en el dominio del tiempo (Danilo Granda, et al., 2018). Una de las fallas que pueden ser detectadas mediante esta técnica son las barras del rotor rotas (BRB).

### 2.3 Transformada de Fourier

La Transformada de Fourier es un método de representación en el dominio de la frecuencia y es una de las técnicas más populares dentro de las aplicaciones industriales. La Transformada de Fourier se denota como (Cabal-Yepez, et al., 2013):

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

Donde  $X(\omega)$  es la función de frecuencia continua, obtenida de la señal continua en el tiempo  $x(t)$ .

### 2.3 Transformada Discreta de Fourier

La Transformada Discreta de Fourier (DFT) está dada por:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk} \quad (2)$$

Donde (Cabal-Yepez, et al., 2013)  $N$  es el total de número de muestras,  $k$  representa el índice de frecuencia discreta ( $0 \leq k \leq N$ ),  $n$  es el índice de tiempo discreto ( $0 \leq n < N$ ), y  $W_N^{nk}$  corresponde al kernel de transformación que está dado por  $W_N^{nk} = e^{-j(\frac{2\pi kn}{N})}$ .

### 2.3 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

La FFT se obtiene descomponiendo la DFT de  $N$ -puntos en pequeñas DFT, para explotar la simetría y periodicidad del factor de fase  $W_N$  (Cabal-Yepez, Eduardo, Garcia-Ramirez, Armando G., Romero-Troncoso, Rene J., Garcia-Perez, Arturo, Osornio-Rios, Roque A., 2013).

### 2.4 Transformada Corta de Fourier (STFT)

La STFT nos permite determinar las componentes de frecuencia contenidas en secciones locales de una señal por medio de su separación en pequeñas ventanas de tiempo, donde cada ventana es analizada utilizando la FFT (Cabal-Yepez, Eduardo, Garcia-Ramirez, Armando G., Romero-Troncoso, Rene J., Garcia-Perez, Arturo, Osornio-Rios, Roque A., 2013).

Matemáticamente, la STFT está representada por (Tamir Bendory, et al., 2018)

$$x_{STFT}[m, k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]w[mL - n]e^{\frac{-2j\pi kn}{N}} \quad (3)$$

Donde  $x$  es la señal en el dominio del tiempo,  $k = 0, \dots, N - 1$ ,  $m = 0, \dots, \left[\frac{N}{L} - 1\right]$ ,  $w$  es la función ventana y  $L$  determina la separación en tiempo entre las secciones adyacentes.

### 2.5 Transformada Corta de Fourier (STFT) y Funciones Ventana

La implementación de Funciones Ventana en la STFT se logra mediante la convolución.

#### 2.1.1 Convolución

La operación definida por la expresión  $\sum_{i=0}^n h[i]x[n-i]$  conoce como la convolución de  $h[n]$  y  $x[n]$ , y se denota con el símbolo “\*”; es decir,

$$h[n] * x[n] = \sum_{i=0}^n h[i]x[n-i], \quad n \geq 0 \quad (4)$$

En términos del símbolo de convolución, se tiene:

$$y[n] = h[n] * x[n], n \geq 0 \quad (5)$$

### 2.3 Función Ventana

En Procesamiento de Señales, una Función de Ventana es una función matemática que se valora en cero fuera de algún intervalo elegido. Representa una herramienta estadística que permite a los usuarios observar una región pequeña de una señal, con la menor cantidad de fugas provenientes de cualquier otra parte de la señal. Las aplicaciones de las funciones de ventana incluyen análisis espectral, diseño de filtro de respuesta finita al impulso (FIR) y conformación de haz (Zoran S. Bojcovik, Bojan M. Bakmaz, Miodrag R. Bakmaz, 2017).

#### 2.3.1 Ventana Hamming

Esta función de ventana está caracterizada por tener buena resolución de frecuencia, reduce el efecto de fuga espectral y tiene un rendimiento de ruido aceptable, la ventana Hamming es utilizada en comunicación y computación para suavizar los datos antes de aplicar el análisis de Fourier (Zoran S. Bojcovik, et al., 2017).

Los coeficientes de la Ventana Hamming se calculan con la siguiente ecuación (Teja MVSR, Ajith Kumar y C.V. Sai Prasanth, 2015):

$$w(n) = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (6)$$

Donde  $0 \leq n \leq N$ .

### 2.3.1 Ventana Gaussiana

Dado que el logaritmo de un Gaussiano produce una parábola, se puede utilizar para la interpolación cuadrática exacta en la estimación de frecuencia dada por:

$$w(n) = e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{n - \frac{(N-1)}{2}}{\frac{\sigma(N-1)}{2}} \right)^2} \quad (7)$$

Donde  $-N/2 \leq n \leq N/2$ ,  $\sigma \geq 2$  es el parámetro de ajuste de la ventana para obtener el “ancho del lóbulo principal–valor máximo del lóbulo principal” deseado y el tamaño de la ventana es  $N - 1$  (Tushar Kanti Roy, Monir Morshed, 2013).

### 2.3.1 Ventana Kaiser

La ventana Kaiser también es conocida como ventana Kaiser-Bessel, es una familia de funciones de ventana de un parámetro utilizada para el procesamiento digital de señales. La ventana Kaiser está dada por (Tushar Kanti Roy, Monir Morshed, 2013):

$$w(n) = \frac{I_0 \left( \pi \alpha \sqrt{1 - \left( \frac{2n}{N-1} - 1 \right)^2} \right)}{I_0(\pi \alpha)} \quad (8)$$

Donde  $0 \leq n \leq N - 1$ ,  $I_0$  es la función modificada de Bessel de primer tipo de orden cero,  $\alpha$  es un número real arbitrario que determina la forma de la ventana. En el dominio de la frecuencia, este determina la composición entre el ancho del lóbulo principal y el nivel de lóbulo lateral, que es una composición central en el diseño de la ventana y el tamaño de la secuencia es  $N - 1$ .

## 3. METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología propuesta para la detección de barras rotas en motores de inducción utilizando STFT y Funciones Ventana se hace mediante el análisis de la firma característica de la señal de corriente del motor de inducción en su estado transitorio de arranque. Primero, se muestrea dicha señal. Segundo, se divide en N-DFTs y se aplica la convolución con la Función Ventana para obtener la transformada rápida de Fourier. Por último, se genera espectrograma para la visualización de la STFT con cada Función Ventana.

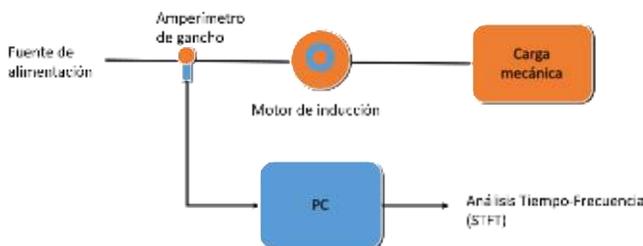


Figura 1. Metodología para el análisis STFT de la señal de corriente del motor de inducción.

Una gran cantidad de resultados demostraron que la aplicación de Funciones Ventana en la STFT logra una mejor visualización del comportamiento de las frecuencias características provocadas por las fallas de barras rotas en motores de inducción.

## 4. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA DETECCIÓN DE BARRAS ROTAS (INSTALACIÓN EXPERIMENTAL)

Las señales que fueron analizadas con el método propuesto se obtuvieron por parte de dos motores de inducción trifásicos de 1hp (modelo WEG 00136APE48T) con dos polos y 28 barras. Se consideran dos casos de estudio operacionales: un motor en estado sano y un motor con 2 barras rotas del rotor.

Para ambas señales, el tiempo de adquisición es  $T=1.2s$  con una frecuencia de muestreo de  $f_s = 1500Hz$ , para todas las pruebas.

### Caso de estudio: Barras Rotas del Rotor

La condición de Barras Rotas del Rotor (BRB) se produce artificialmente perforando un agujero (diámetro 7.938 mm) sin dañar el eje del rotor.



Figura 2. Dos barras rotas del rotor de un motor de inducción.

La detección de fallas de BRB se centra en los componentes de la banda lateral alrededor de la frecuencia  $f_s$  de la corriente de suministro, como sigue (García-Pérez, A., Romero-Troncoso R. d. J., Cabal-Yepez E. and Osornio-Rios R. A., 2011):

$$f_{BRB} = (1 \pm 2ks)f_s, \quad k = 1, 2, 3 \dots \quad (9)$$

Donde  $f_{BRB}$  denota las frecuencias de banda lateral asociadas con las BRB y  $s$  es el slip del motor.

#### 4.1 Motor en estado sano

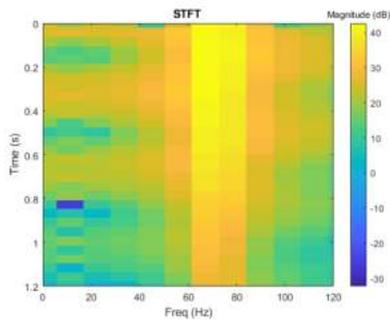


Figura 3. Espectrograma de la STFT del arranque transitorio del motor de inducción en estado sano.

#### 4.2 Motor con dos barras rotas

Se le aplicó un filtro notch para eliminar su frecuencia fundamental de 60Hz, para visualizar de manera más clara los efectos provocados por las barras rotas. En las pruebas realizadas se utilizaron 15 ventanas con un traslape del 50%, ya que permitían una mejor resolución.

En la Fig. (3) muestra el espectrograma de los resultados obtenidos por el análisis STFT de la corriente de motor de inducción en estado sano en el transitorio de arranque. Mientras, en la Fig. (4) se observa la “V” provocada por la presencia de dos barras rotas utilizando la STFT.

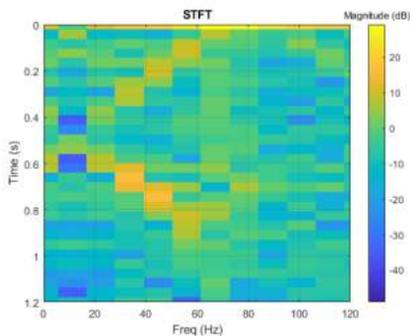


Figura 4. Espectrograma de la señal de corriente de un motor de inducción con 2 barras rotas utilizando STFT.

### 5. RESULTADOS CON STFT Y FUNCIONES VENTANA

Para la prueba de visualización de la STFT con alguna Función Ventana se aplicaron los mismos parámetros (15 ventanas con 50% de traslape), a continuación, se muestran los resultados:

#### 5.1 Ventana Hamming

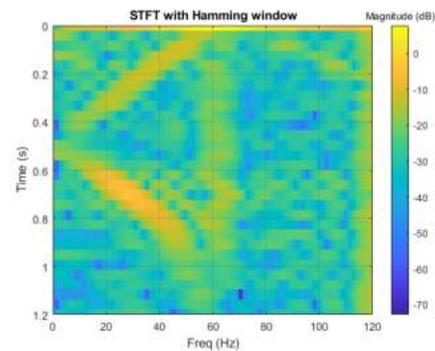


Figura 5. Espectrograma de la STFT con ventana Hamming del motor de inducción con 2 barras rotas.

#### 5.2 Ventana Gaussiana

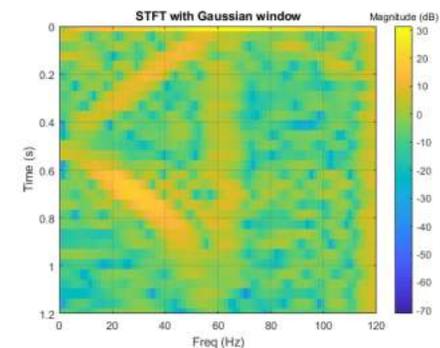


Figura 6. Espectrograma de la STFT con ventana Gaussiana del motor de inducción con 2 barras rotas.

#### 5.3 Ventana Kaiser

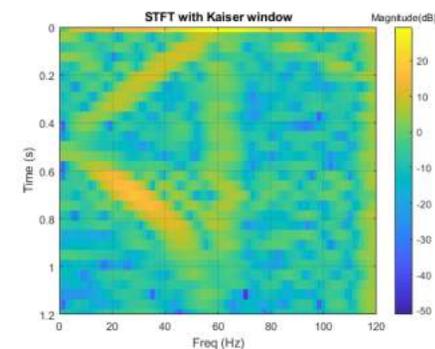


Figura 7. Espectrograma de la STFT con ventana Kaiser del motor de inducción con 2 barras rotas.

### 6. CONCLUSIONES

Dentro de la literatura se han encontrado diversos métodos de representación en tiempo-frecuencia que coadyuvan a la detección de barras rotas en los motores de inducción. Sin embargo, estos mismos resultan insuficientes para lograr

obtener una mejor visualización de las características frecuenciales provocadas por esta falla.

Los resultados obtenidos demuestran que la técnica propuesta basada en STFT y Funciones Ventana resalta el comportamiento característico de las componentes frecuenciales inducidas por la presencia de barras rotas, obteniendo una mejor resolución en comparación con otras técnicas comúnmente utilizadas.

## REFERENCES

- Cabal-Yepez, Eduardo, Garcia-Ramirez, Armando G., Romero-Troncoso, Rene J., Garcia-Perez, Arturo, Osornio-Rios, Roque A. (2013). Reconfigurable Monitoring System for Time-Frequency Analysis on Industrial Equipment Through STFT and DWT. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS*, 9(2), 760-771.
- Danilo Granda, Diego Arcos-Aviles, Danny Sotomayor. (2018). Analysis of signal processing techniques commonly used for broken bars detection on induction motors. *Revista CienciaAmérica*, 7, 60-72.
- Dubravkco, M. (2015). Brief Review of Motor Current Signature Analysis. *HDKBR Info-CrSNDT Journal*, 15, 15-26.
- Garcia-Perez, A., Romero-Troncoso R. d. J., Cabal-Yepez E. and Osornio-Rios R. A. (2011). The Application of High-Resolution Spectral Analysis for Identifying Multiple Combined Faults in Induction Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(5), 2002-2010. doi:10.1109/TIE.2010.2051398
- Garcia-Perez, Arturo, Romero-Troncoso, Rene de Jesus, Cabal-Yepez, Eduardo, Osornio-Rios, Roque Alfredo. (2011). The Application of High-Resolution Spectral Analysis for Identifying Multiple Combined Faults in Inductions Motors. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 58, 2002-2010.
- George Georgoulas, Petros Karvelis, Chysostomos D. Stylios, Ioannis P. Tsoumas, Jose Alfonso Antonino-Daviu, Vicente Climente-Alarcon. (2014). Automatizing the broken bar detection process via Short Time Fourier Transform and two-dimensional Piecewise Aggregate Approximation representation. *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 3104-3110. doi:10.1109/ECCE.2014.6953822
- Ojeda Aguirre, Noe A., Camarena-Martinez, David, Garcia-Perez, Arturo, Romero-Troncoso, Rene J., Valtierra-Rodriguez, Martin, Amezcua-Sanchez, Juan P. (2017). Reassignment technique for detection of broken rotor bar fault in induction motors. *2017 IEEE International Autumn Meeting on Power*, 1-6. doi:10.1109/ROPEC.2017.8261581
- Romero-Troncoso, Rene J., Cabal-Yepez, Eduardo, Garcia-Perez, Arturo, Alvarez-Salas, Ricardo, Granados-Lieberman, David, (s.f.). *Reconfigurable Instrument for Power Quality Monitoring in 3-Phase Power Systems*. 2011: 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives.
- Tamir Bendory, Yonina C. Eldar, Niolas Bounal. (2018). Non-Convex Phase Retrieval from STFT Measurements. *IEEE Transactions on Information Theory*, 64, 467-484.
- Tarek Ameid, Menacer Arezki, Hicham Talhaoui, Imadeddine Harzelli. (2017). Broken rotor bar fault diagnosis using fast Fourier transform applied to field-oriented control induction machine: simulation and experimental study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(1-4), 917-928. doi:10.1007/s00170-017-0143-2
- Teja MVSR, Ajith Kumar y C.V. Sai Prasanth. (2015). Comparative Analysis of Windowing Techniques in Minimizing side lobes in Antenna Array. *International Conference on Communication and Signal Processing, IEEE*, 1381-1383.
- Tushar Kanti Roy, Monir Morshed. (2013). Performance Analysis of Low Pass FIR Filters Design Using Kaiser, Gaussian and Tukey Window Function Methods. *Proceedings of 2013 2nd International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE 2013)*, 1-6.
- Zoran S. Bojcovik, Bojan M. Bakmaz, Miodrag R. Bakmaz. (2017). Hamming Window to the Digital World. *Proceedings of the IEEE*, 105, 1185-1190.