

Análisis de señales no estacionarias en maquinaria eléctrica con variadores de velocidad

Analysis of non-stationary signals in electrical machinery with variable speed drives

José M. Flores-Pérez¹, Luis M. Ledesma-Carrillo², Misael López-Ramírez³

^{1,2,3}Departamento de Estudios Multidisciplinarios del la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato
jm.floresperez@ugto.mx¹, lm.ledesma@ugto.mx², lopez.misael@ugto.mx³

Resumen

Las máquinas eléctricas alimentadas con variadores de velocidad han sido sujeto de estudio constante debido a su aplicabilidad en tareas industriales, siendo el propósito principal el diagnosticar fallas y evitar paradas forzadas en líneas de producción. En la literatura se han propuesto una gran cantidad de métodos, sin embargo, siempre enfrentan limitaciones que dejan la puerta abierta para el desarrollo de nuevas metodologías. Este trabajo presenta una metodología que permite tener una comparación de tres diferentes técnicas de análisis tiempo-frecuencia (STFT, WT, y WVD), utilizando señales experimentales de la corriente del estator de un motor de inducción trifásico en condiciones no estacionarias. Los resultados muestran características particulares de cada uno de los métodos utilizados en la extracción de información del transitorio de arranque que permite visualizar futuras aplicaciones de diagnóstico de fallas.

Palabras clave: Análisis espectral, tiempo-frecuencia, velocidad variable, no estacionarias, multicomponente

Introducción

En el análisis de señales provenientes de máquinas eléctricas en condiciones de velocidad variable, son utilizados un conjunto de técnicas y algoritmos de procesamiento en los que las variables tiempo(t) y frecuencia (f) son utilizadas simultáneamente. Estas señales se clasifican como variables en el tiempo y no estacionarias por la variación de sus frecuencias con respecto al tiempo.

El principal objetivo del análisis en máquinas eléctricas en condiciones de velocidad variable es extraer tanta información como sea posible y utilizarla en el proceso de resolución de problemas de diagnóstico temprano de fallas. Por ejemplo, Shi, J. et al. (2019), monitorea las condiciones de los rodamientos en condiciones de operación de velocidad variable, a partir de la representación tiempo-frecuencia de las señales de vibración. D. Zhang et al (2019), utiliza un método de extracción de características llamado, filtrado múltiple paralelo tiempo-frecuencia, aplicando la transformada wavelet discreta bidimensional en la detección de fallas en motores de inducción, basado en imágenes espectrales. A su vez, T.A. García et al. (2022), propone un método de detección defectos en rotores de motores de inducción en condiciones de frecuencia variable implementando la normalización de la frecuencia fundamental, incluyendo el uso del análisis tiempo-frecuencia de señales de corriente del estator. También, Misra et al. (2022), identifica fallas bajo diversas condiciones de carga en un rotor de motor de inducción mediante la extracción de características en el dominio tiempo-frecuencia y una red neuronal convolucional para diagnosticar la gravedad de la falla.

Como se observa en la literatura, definir las características de la señal bajo investigación representa el paso más importante en la solución de problemas de máquinas eléctricas, de este modo, el análisis de tiempo-frecuencia contribuye de forma eficiente en la comprensión cualitativa y cuantitativa de las características de frecuencia temporal más importantes, es decir, se presentan ciertas pérdidas de señal, sin embargo, se gana información.



Metodología Propuesta

Motivados por las características y utilización de la representación tiempo-frecuencia de señales, se propone la metodología de la Figura 1, para la comparación de tres técnicas clásicas, la transformada de Fourier en tiempos cortos (STFT), distribución wigner ville (WVD) y la transformada wavelet (WT) en el análisis de señales procedentes de un motor de inducción (MI) trifásico. Para realizar la recopilación de datos (señales de corriente del MI), se utiliza una tarjeta de adquisición de nacional Instrument y el software LabVIEW 2021, para el análisis los datos fueron procesados con Matlab R2022.

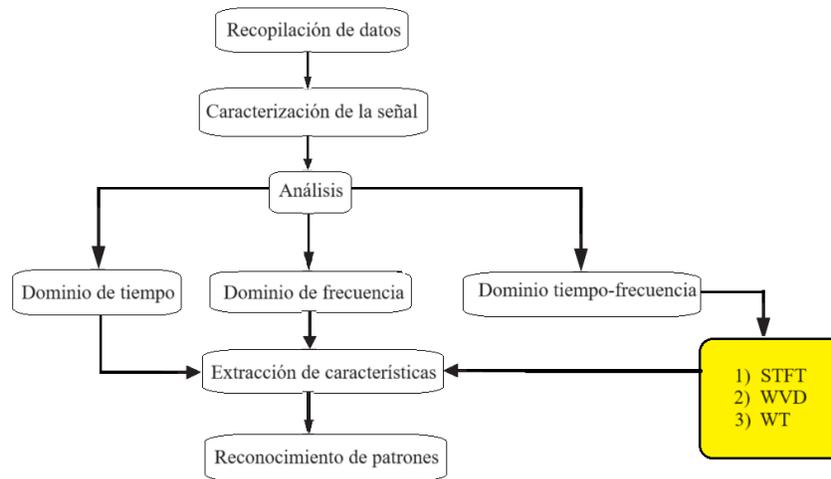


Figura 1. Metodología propuesta para la comparación de técnicas de análisis tiempo-frecuencia en maquina eléctrica.
Fuente: Elaboración propia.

Al banco experimental utilizado en este trabajo se ilustra de manera grafica en la Figura 2, lo compone un motor de inducción trifásico de jaula de ardilla, asíncrono, marca WEG, modelo 00136AP3E48TCT, con un alternador acoplado como carga mecánica. Se adquirió la señal de una línea de alimentación con el sensor de efecto half modelo L08P150D15, mara TAMURA con una frecuencia de muestreo de 2kHz, durante 10 segundos, por medio de una tarjeta adquisición National Instruments USB-6003. Las pruebas experimentales se tomaron bajo dos condiciones de operación. El primer caso es el transitorio de arranque alimentado por la red eléctrica. Para el segundo, la variación frecuencial lineal con el variador de velocidad CFW300 marca WEG, suministrando una rampa de frecuencias de 0 a una base 60Hz.



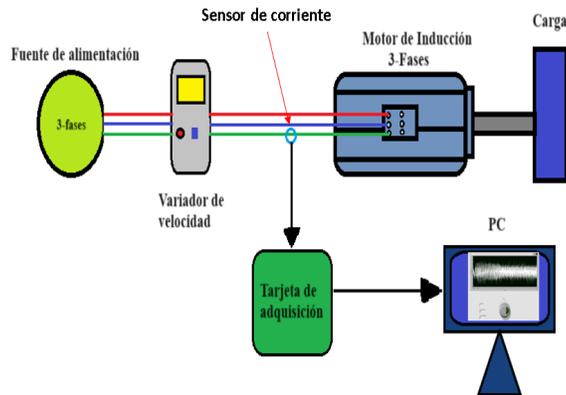


Figura 2. Diagrama de banco de pruebas experimental.
Fuente: Elaboración propia.

Descripción general de señales experimentales

Es importante conocer el tipo de señal para seleccionar las características que se desean estimar, para desarrollar las herramientas apropiadas para su análisis, una señal muy específica es el transitorio de arranque de un motor de inducción, utilizada en el diagnóstico de fallas. De manera clásica las señales de análisis se representan de forma temporal $x(t)$ y espectral $X(f)$ que dan paso a la caracterización de la señal. Las características de una señal en tiempo y los algoritmos efectivos para extraer características dependerán del tipo de señal. La señal en tiempo $x(t)$ revela la siguiente información: tiempo de inicio, tiempo final, su fuerza, evolución temporal, distribución de energía a lo largo del tiempo. La figura 3 muestra la representación en el dominio del tiempo de dos señales experimentales de corriente del estator del motor de inducción (MI) trifásico descrito anteriormente, estas señales oscilan con una frecuencia fundamental (f_i) de 60Hz, descritas como no estacionaria por sus características estadísticas variables en el tiempo (frecuencia, media, desviación estándar, etc.).

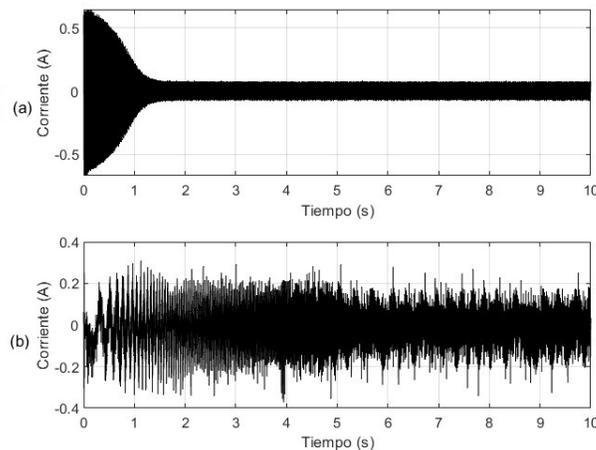


Figura 3. Señal experimental de corriente del estator de motor de inducción durante el transitorio de arranque alimentado por a) Red eléctrica. b) Variador de velocidad.
Fuente: Elaboración propia.



Se debe señalar que la corriente transitoria de arranque del estator del MI alimentado directo a la red eléctrica, produce una corriente mayor que la corriente al utilizar el variador de velocidad.

Ahora bien, la transformada de Fourier provee una representación en función de la frecuencia, permitiendo una representación del contenido espectral de la señal. La representación espectral $X(f)$ (Figura 4), proporciona la siguiente información: frecuencias presentes en la señal, magnitud, frecuencia mínima, frecuencia máxima, ancho de banda. Sin embargo, es muy difícil usar la información contenida sobre sus características debido a que no provee una distribución de tiempo en su componente espectral, en otras palabras, el espectro en frecuencias muestra las frecuencias presentes en la señal, pero no el tiempo en el que ocurren dichas frecuencias

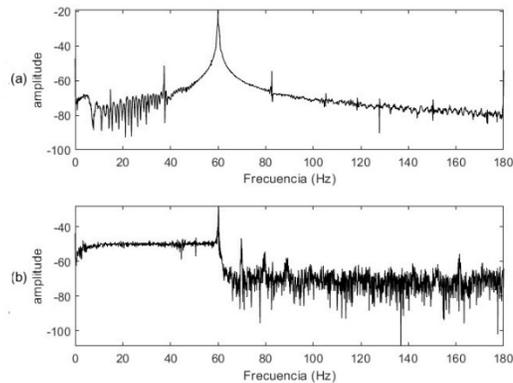


Figura 4. Espectro de frecuencias de las señales experimentales del transitorio de arranque a) Red eléctrica. b) Variador de velocidad.
"Fuente: Elaboración propia"

De lo descrito anteriormente, es posible observar que para analizar las señales de los transitorios de arranque, el espectro en frecuencia no es adecuado por las características no estacionarias de las señales experimentales, por suponer la FT que las componentes senoiales existen en todo t , cuando la frecuencia cambia continuamente y se complica aún más con el ruido (Figura 4), cuyo contenido varia con el tiempo por la conmutación de alta frecuencia de los dispositivos de potencia que utiliza en su operación el variador de velocidad (M. Rashevskaya et al (2018)).

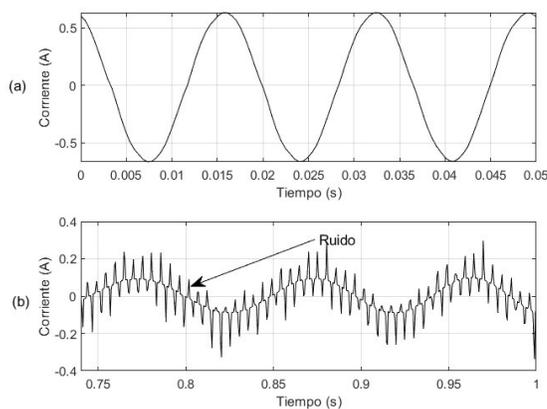


Figura 5. Comparación de niveles de ruido de la señal experimental a) Red eléctrica. b) Variador de velocidad.
Fuente: Elaboración propia.



La complejidad del análisis se debe a que los diferentes componentes en la señal varían, lo que indica que es necesario conocer la relación tiempo-frecuencia (t, f) para cada componente y así poder extraer información con precisión. Debido a que la representación de amplitud potencia de la Figura 4 no indican cómo se comporta el contenido de frecuencia con respecto al tiempo, se necesita una representación que pueda revelar no solo que frecuencias están presentes, sino también cuando están presentes. Esta variación de frecuencias cuenta con información crítica en el proceso de estudio.

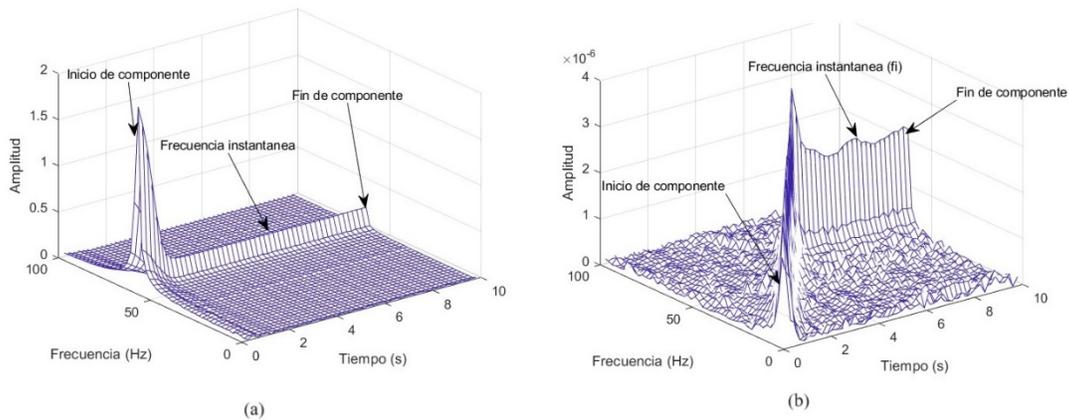


Figura 6. Representación tiempo-frecuencia de los transitorios de arranque del MI con alimentación de a) Red eléctrica. b) Variador de velocidad.
 Fuente: Elaboración propia.

La figura 5 revela la dependencia del tiempo y frecuencia de las señales del transitoria de arranque no estacionarias del MI, sus diferencias se visualizan solo de forma aproximada tanto en el dominio del tiempo como en su espectro frecuencial, pero aparecen de forma clara en la representación (t-f), permitiendo mediciones precisas de las frecuencias y el momento en que aparecen. En ambos casos los tiempos de inicio y fin de cada componente e incluyendo la variación de su contenido frecuencial son fácilmente identificables.

Resultados

El procesamiento en (t f) representa un espacio completo de la señal no estacionaria recibida del sensor de corriente, colocado en una línea de fase de alimentación del MI de una manera accesible. La transformada de tiempos cortos de Fourier (STFT) permite la superposición de ventanas de tiempo que ayudan a suavizar el resultado de tiempo-frecuencia (Cabal-Yeppez et al (2013)), haciendo que los cambios en las características de las frecuencias que varían en el tiempo sean fáciles de ver. Matemáticamente, la STFT es representada en su forma discreta como:

$$X(m, \omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)w(n - m)e^{-j\omega n} \quad (1)$$

La representación (t f) obtenida con la STFT de las señales experimentales se muestran en la Figura 7. Determina la densidad espectral de potencia a lo largo del tiempo utilizando diferentes colores para designar bandas de frecuencia con mayor energía.



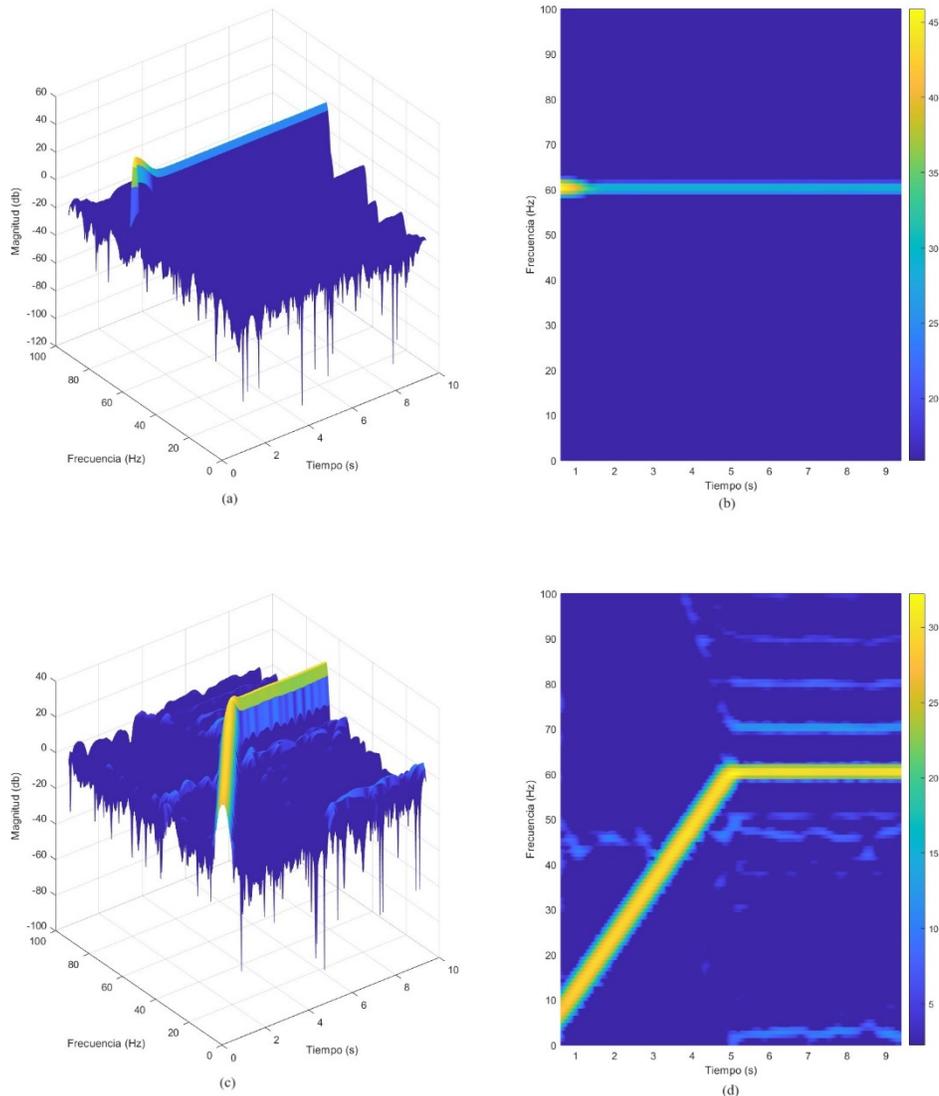


Figura 7. Análisis STFT del transitorio de arranque del MI trifásico alimentado por a) Red eléctrica. b) Variador de velocidad.
Fuente: Elaboración propia.

Las Figura 7(a) y 7(b) presenta el espectrograma 3D y 2D respectivamente de la corriente del motor alimentado de la red eléctrica, se puede observar que la frecuencia fundamental de 60 Hz se mantiene durante todo el periodo de tiempo, además, es posible observar que se trata de una señal multicomponente. De manera similar la Figura 7(c) y 7(d) se describe el comportamiento de la señal del motor alimentado con el variador de velocidad, es notable ver que la frecuencia aumenta con relación al tiempo hasta llegar a la frecuencia fundamental, también se observan diferentes componentes.

La STFT es una buena opción al determinar el espectro de frecuencias de las señales no estacionarias que se han estado analizando, con algunas limitaciones, por ejemplo: Las pequeñas fluctuaciones de frecuencia son difíciles de detectar y es son comunes las discrepancias entre el resultado de frecuencia temporal y los datos de la señal original. Esto indica una fuga temporal, resultado de la utilización de ventanas, esto es inevitable, pero puede minimizarse tomando ventanas de tiempo más pequeñas, aunque se sacrifica en resolución de frecuencia.



La transformada wavelet (WT) continua es análoga a la transformada continua de Fourier, descompone la señal en funciones elementales, a diferencia de la STFT analiza a la señal con distintas escalas y desplazamientos de una función base, produciendo una ventana flexible cuyo tamaño es variable. Para las señales experimentales no estacionarias analizadas se utilizan ventanas de tiempo estrechas y ventanas de frecuencia amplias para proporcionar mayor nivel de información de frecuencias (Z. Haiyan et al. (2013)). En el análisis de señales habitualmente se utilizan varias funciones wavelet, sin embargo, para fines de análisis espectral en este trabajo, se utiliza la wavelet Morlet que matemáticamente se describe como

$$\psi(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{-\frac{1}{2}t^2} e^{-i\omega_0 t} \quad (2)$$

La representación (t f) obtenida con la CWT de las señales experimentales se muestran en la Figura 8. El escalograma representa la fuerza de un coeficiente de la transformada wavelet particular en un momento determinado análogo al espectrograma

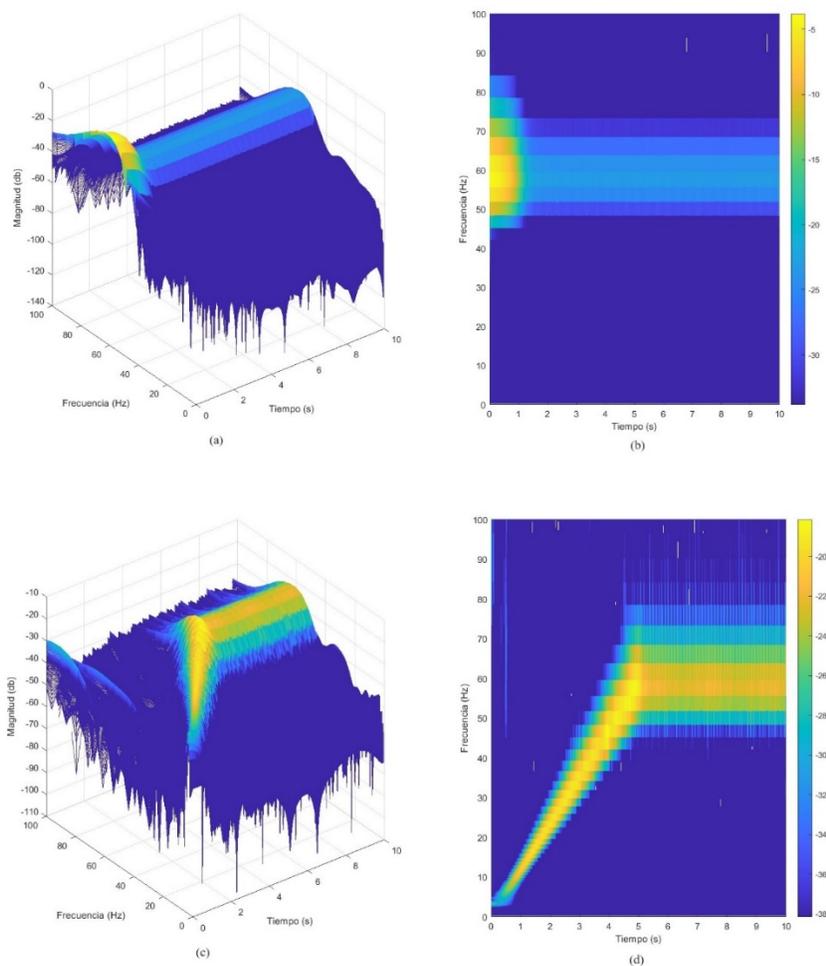


Figura 8. Análisis WT del transitorio de arranque de MI trifásico alimentado por a) Red eléctrica. b) Variador de velocidad.
Fuente: Elaboración propia.



La representación (t-f) basadas en la transformada wavelet de la corriente del estator alimentado de la red eléctrica durante el arranque se muestran en la Figura 8 a) y b). Por otro lado, en la Figura 8 c) y d) se presenta el análisis (t f) para la corriente del estator cuando el motor se arranca con el variador de velocidad. Se debe tomar en cuenta que la relación entre escala y frecuencia es inversa, significa que la frecuencia aumenta al disminuir la escala, así la resolución de frecuencia mejora para bandas de frecuencia más altas.

La Distribución Wigner Ville (WVD), se expresa como la transformada de Fourier de la autocorrelación de la señal en tiempo $x(t)$, Satisface un numero de propiedades matemáticas deseables y tiene la capacidad para analizar señales moduladas en fase no estacionarias (C. Guanghua (2008)). Matemáticamente se expresa como:

$$W_z(t, f) = \mathcal{F}_{\tau \rightarrow f} \left\{ z \left(t + \frac{\tau}{2} \right) z^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right\} \quad (3)$$

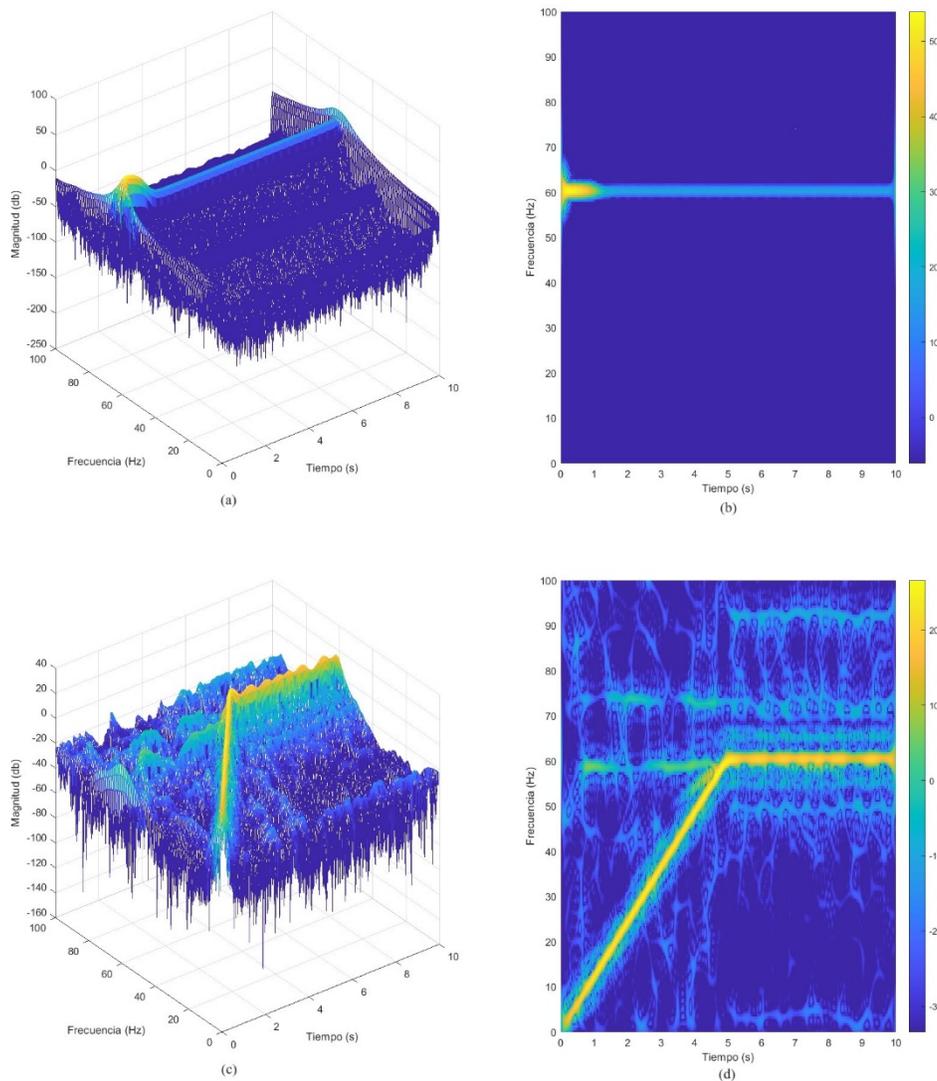


Figura 9. Análisis WVD del transitorio de arranque de MI trifásico alimentado por a) Red eléctrica. b) Variador de velocidad.
 Fuente: Elaboración propia.



La representación (t f) obtenida con la WVD de las señales experimentales se muestran en la Figura 9. El espectro representa los atributos de densidad de energía que integra la potencia instantánea.

El análisis (f t) aplicando la WVD de la Figura 9 a) y b) muestra los componentes principales de la corriente del estator del motor alimentado de la red eléctrica. Se puede observar el armónico principal siguiendo un patrón lineal. El método basado en WVD también permite la observación de otros armónicos que difícilmente se ven en las anteriores metodologías. En la Figura 9 c) y d) se muestra la corriente del estator del MI, pero con el variador de velocidad, se observa que el armónico principal que tiene un comportamiento ascendente hasta llegar la frecuencia fundamental, después del transitorio de inicio. Es fácil reconocer la diferencia en resolución de la distribución Wigner Ville respecto a la cantidad de información que presenta su espectro, sin embargo, puede ser contra productiva al llevar a información falsa.

Conclusiones

En este trabajo, se ha presentado una comparación de tres métodos de análisis tiempo frecuencia de señales no estacionarias experimentales de una máquina eléctrica (motor de inducción trifásico), proponiendo una metodología para el análisis de los transitorios de arranque. Los resultados muestran con precisión la señal multicomponente variable en el tiempo con un nivel de precisión respectiva al método utilizado, esto con fines de diagnóstico de características de comportamiento al utilizar variadores de velocidad.

En los resultados experimentales, es posible apreciar que la distribución Wigner-Ville presenta mayor resolución permitiendo mejor localización de la energía de las componentes que caracterizan el comportamiento del transitorio de arranque del motor de inducción con variador de velocidad, demostrando ser una herramienta con potencial para un análisis a mayor en la búsqueda de posibles fallas.

Agradecimientos

Se reconoce y agradece al "Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) – México", por financiar parcialmente esta investigación a través de la beca de posgrado 388269 otorgada a José Manuel Flores Pérez.

Referencias

- C. Guanghua, M. Shiwei, L. Ming, Z. Jingming and Z. Weimin, "Wigner-Ville distribution and cross Wigner-Ville distribution of noisy signals," in *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1053-1057, Oct. 2008, doi: 10.1016/S1004-4132(08)60196-6.
- Cabal-Yopez, E., Garcia-Ramirez, A. G., Romero-Troncoso, R. J., Garcia-Perez, A., & Osornio-Rios, R. 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. doi:10.1109/tii.2012.2221131
- D. Zhang, X. Ding, W. Huang and Q. He, "Transient Signal Analysis Using Parallel Time-Frequency Manifold Filtering for Bearing Health Diagnosis," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 175277-175289, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2956824.
- Misra, S., Kumar, S., Sayyad, S., Bongale, A., Jadhav, P., Kotecha, K., Abraham, A., et al. (2022). Fault Detection in Induction Motor Using Time Domain and Spectral Imaging-Based Transfer Learning Approach on Vibration Data. *Sensors*, 22(21), 8210. <https://doi.org/10.3390/s22218210>.
- M. Rashevskaya, S. Yanchenko and S. Tsyruk, "Assessment of non-stationary harmonic distortion related to adjustable speed induction motor and soft starters," 2018 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIELA.2018.8447097.



- Shi, J., Du, G., Ding, R., & Zhu, Z. (2019). Time frequency representation enhancement via frequency matching linear transform for bearing condition monitoring under variable speeds. *Applied Sciences*, 9(18), 3828.
- T. A. Garcia-Calva, D. Morinigo-Sotelo and R. de Jesus Romero Troncoso, "Fundamental Frequency Normalization for Reliable Detection of Rotor and Load Defects in VSD-Fed Induction Motors," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 37, no. 2, pp. 1467-1474, June 2022, doi: 10.1109/TEC.2021.3124803.
- Z. Haiyan, Z. Tao and C. Minsha, "The electrical fault diagnosis of early induction motor based on wavelet transform," 2013 2nd International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA), Toronto, ON, Canada, 2013, pp. 608-610, doi: 10.1109/IMSNA.2013.6743350.

