



Técnicas de procesamiento de señales utilizadas para el análisis de la distorsión armónica generada por variadores de frecuencia en motores de inducción

Signal Processing Techniques Used for Analyzing Harmonic Distortion Generated by Variable Frequency Drive in Induction Motors

Manuel Iván Ballesteros Camacho¹ Francy Julieth Cadena Villalba²
Adolfo Andrés Jaramillo Matta³

Para citar este artículo: Ballesteros, M., Cadena, F., y Jaramillo, A. (2015). Técnicas de procesamiento de señales utilizadas para el análisis de la distorsión armónica generada por variadores de frecuencia en motores de inducción. *Redes de Ingeniería*, 6(1), 72-84.

Recibido: 27-febrero-2015 / **Aprobado:** 10-junio-2015

Resumen

Se presenta una detallada revisión del estado del arte de las técnicas de procesamiento de señales utilizadas para el análisis de la distorsión armónica generada por variadores de frecuencia en motores de inducción con rotor jaula de ardilla, referenciando algunas de las investigaciones más relevantes relacionadas con este tema. Finalmente, son identificadas oportunidades de investigación que a la fecha no han sido tratadas por la comunidad científica en este campo del conocimiento.

Palabras clave: accionamientos eléctricos de control de velocidad, estado del arte, perturbaciones armónicas, técnicas de procesamiento de señales.

Abstract

This article presents a detailed review of the state of the art of signal processing techniques used for the analysis of harmonic distortion generated by variable frequency induction motors with squirrel cage rotor is presented, referencing some of the most relevant research related with this issue. Finally, are identified research opportunities that to date have not been addressed by the scientific community in this field of knowledge.

Keywords: electric motor-driven system, state of the art, harmonic distortion, signal processing techniques.

1. Ingeniero eléctrico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, miballesterosc@correo.udistrital.edu.co
2. Ingeniera eléctrica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, fjcadnav@correo.udistrital.edu.co
3. Ingeniero Electrónico, Universidad del Valle, Colombia, Maestría en Ingeniería, énfasis en Automática, Universidad del Valle, Colombia, Maestría en Ingeniería Electrónica, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, España, Doctor en Ingeniería Electrónica, Eléctrica y Comunicaciones, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, España, profesor de planta e investigador, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, ajaramillom@udistrital.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En los procesos productivos de la industria se utilizan comúnmente sistemas de accionamiento eléctrico constituidos por motores de inducción (Mdl), en particular los de rotor jaula de ardilla. Dichos motores son ampliamente utilizados hoy día y hacen parte de los accionamientos que más consumen energía [1], [2]. Una de las soluciones planteadas para incrementar la eficiencia y reducir el consumo energético ha sido utilizar motores de eficiencia Premium en vez de motores de eficiencia estándar. Uno de los procesos más comunes en los accionamientos mencionados es el control de velocidad del Mdl, para lo cual se utilizan variadores de velocidad que generan ventajas, en cuanto ahorro energético, reducción del desgaste y de la probabilidad de falla [3]. No obstante, la electrónica de potencia presente en estos dispositivos convierte al accionamiento en una importante carga no lineal que genera armónicos a la red de suministro eléctrico [4], [5], ocasionando efectos nocivos a empresas distribuidoras y generadoras de energía, daños o fallas a equipos eléctricos, electrónicos, sistemas de control y pérdidas económicas considerables por retrasos o paradas indeseadas en procesos de producción [6].

Por otra parte, para el estudio de las componentes armónicas presentes en las señales de tensión y corriente, la literatura matemática ha propuesto el uso de técnicas de procesamiento en frecuencia como la Transformada de Fourier (FT). Sin embargo, este método de análisis no brinda datos suficientes para evaluar el comportamiento armónico de las señales, ya que entre sus limitaciones se destaca la poca información que se puede obtener cuando las señales son no estacionarias (cuya frecuencia varía en el tiempo) [7], [8]. En consecuencia, diversas investigaciones han demostrado que el uso de técnicas de procesamiento en tiempo-frecuencia como la Transformada en tiempo corto de Fourier (STFT) y la Transformada Wavelet (WT) genera

mejores resultados respecto al análisis de señales no estacionarias y de rápida transitoriedad.

A continuación se presenta un detallado estado del arte, que permite poner en evidencia algunos de los trabajos más representativos de los últimos años sobre las técnicas de procesamiento de señales utilizadas para el análisis de la distorsión armónica generada por variadores de frecuencia en motores de inducción con rotor jaula de ardilla.

2. DISTORSIÓN ARMÓNICA GENERADA POR VARIADORES DE FRECUENCIA EN MOTORES DE INDUCCIÓN

2.1. Aplicación de la Transformada de Fourier en el análisis de armónicos

La Transformada de Fourier (FT) es una de las técnicas más utilizadas en el procesamiento de señales, que descompone una señal o función en senos y cosenos de diferentes frecuencias y cuya suma corresponde a la señal original [9]. En la figura 1 se puede observar la representación.

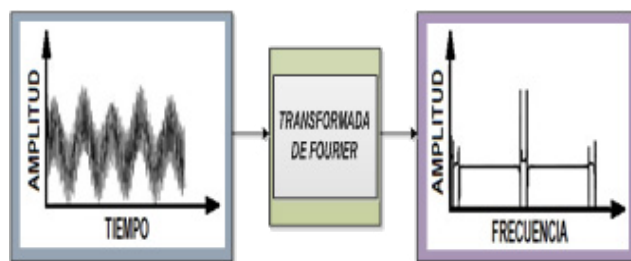


Figura 1. Representación esquemática de la FT. Modificado de [9].

La Transformada de Fourier de una señal $x(t)$ se define como:

$$F\{x(t)\} = X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

La FT es de gran utilidad cuando es aplicada a señales de carácter estacionario. Sin embargo, si este

tipo de análisis se aplica a una señal no estacionaria $x(t)$, cualquier cambio abrupto en el dominio del tiempo en la señal se hace extensivo a todo el dominio de frecuencia en $X(f)$, por lo que muchos de los aspectos temporales de $x(t)$, tales como el comienzo y el fin de la señal, así como los instantes de aparición de singularidades, no pueden ser examinados apropiadamente por el análisis de Fourier [10], [11].

A pesar de la desventaja que presenta la Transformada de Fourier, esta ha sido ampliamente utilizada para el estudio de armónicos y análisis de fallas en Mdl, como se puede evidenciar en [12], [13], [14], [15], [16], [17]. En la figura 2 se presenta una línea de tiempo donde se relacionan algunas de las publicaciones más relevantes en los últimos años sobre el uso de la FT para el estudio de armónicos originados por la presencia de fallas en: Mdl y accionamientos eléctricos de control de velocidad.

En [18], [19], [20], [21] abordan el tema de mantenimiento predictivo en Mdl mediante el uso de

MCSA (Current Signature Analysis). Realizan el análisis espectral de frecuencia de la señal de corriente estática utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Destacan que la FFT es de gran utilidad cuando el motor se encuentra operando bajo condiciones estacionarias. Adicionalmente, desarrollan estudios teórico-prácticos sobre las principales fallas que afectan los Mdl: problemas en los rodamientos, rotura de barras en la jaula de ardilla y cortocircuitos en los bobinados del estator. En [22] además, construyen un banco de ensayos en el cual simulan los diversos tipos de fallas que se presentan en el Mdl y que pueden ocasionar armónicos en la señal de tensión y corriente. También plantean una metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallas, basada en el análisis espectral de frecuencia de la corriente del motor. En [23] proponen un algoritmo de diagnóstico preciso y eficiente para la detección de fallas en barras rotas del rotor de jaula de ardilla de los motores de inducción trifásicos (BRBS) bajo diferentes condiciones de carga. El índice de diagnóstico de fallas (FSDO) propone considerar la corriente del estator

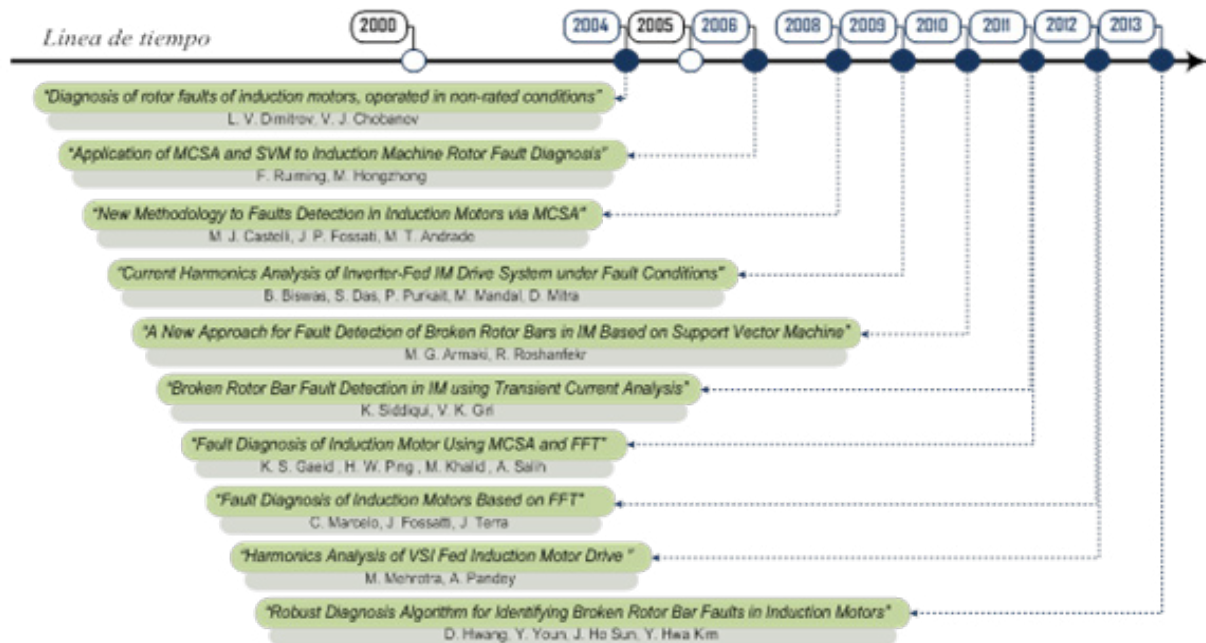


Figura 2. Estudios publicados en el mundo sobre el uso de la FT para el estudio de armónicos originados por la presencia de fallas en accionamientos eléctricos de control de velocidad.

sobre la base de todas las frecuencias sensibles de falla, realizando un análisis MCSA apoyado en el método de la FFT. Los resultados experimentales obtenidos muestran que el algoritmo de diagnóstico utilizado proporciona el rendimiento óptimo sin carga y con carga finita cuando el motor opera en condiciones normales.

En [24] proponen un nuevo enfoque para la detección de fallas presentes en el rotor, utilizando el SVM (Support Vector Machine). Características tales como área de la curva, ángulo de cresta y amplitud armónica son extraídas de la densidad espectral de potencia (PSD) de la corriente en régimen permanente, utilizando la FFT como herramienta matemática. El método propuesto es aplicado a un motor de inducción trifásico de 1.5 kW. Los resultados obtenidos demuestran la alta eficiencia del método desarrollado en la detección de fallas en el rotor. En [25] se determina una metodología de monitoreo y diagnóstico para motores asíncronos que se pueden aplicar a nivel industrial, sin sacar al motor de la línea de producción, siendo dicha metodología: de fácil aplicación, económica y muy confiable. Este método se basa en la descomposición espectral de la señal de corriente, a través de la FFT. El sistema propuesto es capaz de determinar el valor exacto del componente armónico en estudio, independientemente del tiempo de muestreo. Esta técnica también permite determinar la medida exacta del defecto y la frecuencia asociada al armónico, y de esta manera, estudiar las tendencias de crecimiento de fallas.

En [26] realizan el análisis de los armónicos de corriente presentes en un accionamiento eléctrico de control de velocidad que se encuentra sometido a diferentes condiciones de falla. Se estudian las respuestas de frecuencia y se comparan para establecer la utilidad de la FFT en la identificación de la naturaleza de la falla. En [27] analizan los armónicos presentes en accionamientos eléctricos de control de velocidad utilizando MATLAB/Simulink

y la Transformada Rápida de Fourier como herramientas para el desarrollo de esta investigación.

2.2. Aplicación de la Transformada en Tiempo Corto de Fourier en el análisis de armónicos

La STFT evalúa la señal a través de una ventana de análisis que la recorre, donde una vez se elige un determinado tamaño de la ventana, esta será la misma para todas las frecuencias [28], [29]. En la figura 3 se puede observar la representación esquemática de la STFT.

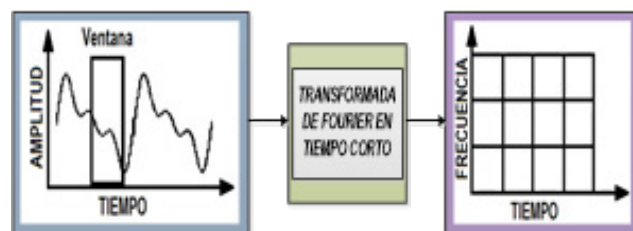


Figura 3. Representación esquemática de la STFT. Modificado de [9].

La Transformada en Tiempo Corto de Fourier es definida [30] como:

$$STFT(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) g^*(t-\tau) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2)$$

Entre las funciones ventana más utilizadas se encuentran las de tipo gaussiano (Hamming, Hann), ya que pueden alcanzar buenas resoluciones simultáneamente en tiempo y frecuencia. Se encuentran definidas por:

$$g_{t,\tau} = e^{-\pi(t-\tau)^2} \quad (3)$$

donde: τ es el factor de desplazamiento.

En esencia, la STFT evalúa la Transformada de Fourier original sobre la señal vista a través de la ventana de análisis, a medida que esta es desplazada, recorriendo la totalidad de la señal de estudio. Sin

embargo, existe una limitación en la magnitud de las resoluciones en tiempo y frecuencia [31]. Esta limitación indica que es imposible definir una ventana de análisis $g(t)$, con resolución temporal Δt , cuya energía se encuentre perfectamente localizada en el tiempo, y que, simultáneamente, su Transformada de Fourier $G(f)$ (con resolución en frecuencia Δf) posea su energía perfectamente localizada en frecuencia. Debido a esto, una ventana de análisis de corta duración será ideal para determinar la ubicación temporal de una frecuencia, mientras que una ventana de larga duración será útil para determinar las frecuencias presentes en la señal de análisis [11].

En la figura 4 se presenta una línea de tiempo donde se destacan algunas de las publicaciones científicas más relevantes en los últimos años, sobre el uso de la STFT en la detección y análisis de perturbaciones armónicas originadas por fallas en: accionamientos eléctricos de control de velocidad y Mdl.

En [32] explican cuatro métodos de análisis tiempo-frecuencia diferentes para la detección y

categorización de fallas (análisis de la discriminación múltiple (MDA), análisis de imán permanente de corriente alterna (PMAC), Transformada en Tiempo Corto de Fourier (STFT) y Transformada Wavelet Discreta Undécimal (UDWT)) que se pueden presentar en los Mdl. Estas técnicas de análisis son comparadas mediante el uso de un algoritmo matemático basado en el número de clasificaciones correctas y relación discriminante de Fisher.

En [33], [34] realizan un estudio comparativo de las técnicas de análisis FFT, STFT y WT para el diagnóstico de fallas en motores de inducción. La STFT determina la frecuencia sinusoidal y el contenido de fase de las secciones locales de una señal. La STFT se utiliza para estimar el contenido de frecuencia de una señal. Por otro lado, Wavelet muestra cambios en la amplitud y distribución de los armónicos y es la transformación adecuada para ser aplicada en señales no estacionarias. Concluyen que los nuevos métodos como la STFT y el análisis Wavelet permiten diagnosticar con eficacia las fallas de cortocircuito y de rotura de barras en la jaula de ardilla del Mdl. En [35] analizan los efectos producidos por

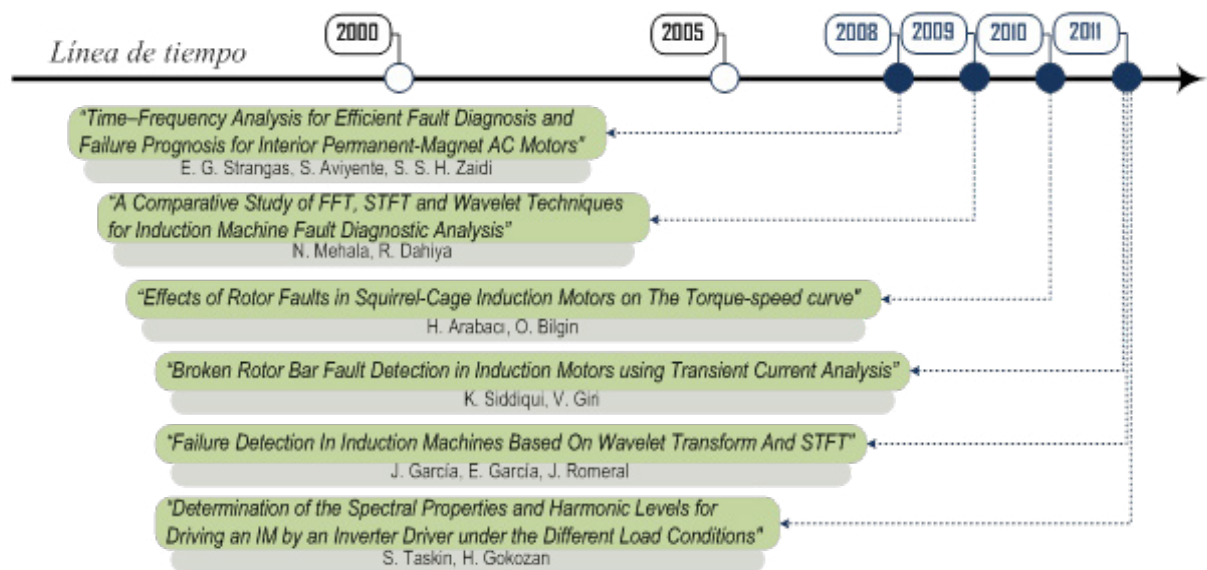


Figura 4. Estudios publicados en el mundo sobre el uso de STFT en la detección y análisis de armónicos originados por fallas en accionamientos eléctricos de control de velocidad.

las fallas de rotor del motor de inducción de jaula de ardilla en la curva par-velocidad. En el estudio, los datos experimentales utilizados se obtuvieron de motores de 10HP, 25HP, 30HP y 50HP. Los experimentos se realizaron durante la puesta en marcha de los motores. El análisis se realizó utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y la Transformada en Tiempo Corto de Fourier (STFT).

En [36] proponen utilizar para la detección de fallas el análisis de espectrograma de la Transformada Rápida de Fourier (STFT) y la Transformada Wavelet (WT), que consumen menos tiempo de procesamiento. Destacan que mediante el análisis de la STFT se puede centrar la atención en los armónicos de alta frecuencia y determinar fallas de cortocircuito, aunque se dificulta el análisis para señales cambiantes en el tiempo, por lo que se hace necesario recurrir al uso de la Transformada Wavelet (WT). La WT para torques variables permite calcular un parámetro de decisión como la energía o valor rms que evidencia el tipo de falla de la máquina de forma segura.

En [37] las corrientes de cada fase que alimentan el Mdl son analizadas utilizando la STFT y la densidad espectral de energía. Se consideran los niveles de distorsión armónica producidos por un variador de frecuencias utilizadas para controlar la velocidad mecánica de rotación del Mdl. El estudio es realizado bajo diferentes condiciones de carga.

2.3. Aplicación de la Transformada Wavelet en el análisis de armónicos

Para reducir la limitación en resolución presente en la STFT, y que se ajuste la resolución de la ventana de análisis, tanto en tiempo como en frecuencia, se recurre al uso de la Transformada Wavelet (WT) [28], la cual permite obtener una representación, descomposición y reconstrucción de una señal, que presente cambios abruptos en sus componentes de tiempo-frecuencia en forma instantánea, a través del análisis multiresolución con ventanas de

longitud variable, adaptadas al cambio de frecuencia de la señal [38]. En la figura 5 se puede observar la representación esquemática de la WT.

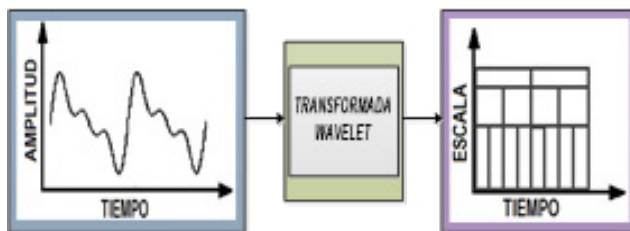


Figura 5. Representación esquemática de la WT. Modificado de [9].

La Transformada Wavelet de una función $s(t)$, está definida por la siguiente ecuación [39]:

$$S(a, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left(\frac{t-\tau}{a} \right) \cdot s(t) \cdot dt \quad (4)$$

donde: a es la dilatación y τ es el factor de translación.

Las Wavelets son funciones básicas de la Transformada Wavelet y son generadas a partir de la translación y cambio de escala de una misma función Wavelet $\psi(t)$, llamada la "Wavelet madre", definida como:

$$\psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{t-\tau}{a} \right) \quad (5)$$

donde: a es la dilatación, τ es el factor de translación y $\psi(t)$ es la Wavelet madre [39].

Las wavelets $\psi_{a,\tau}(t)$ generadas de la misma función wavelet madre $\psi(t)$ tienen diferente escala s y ubicación t , pero tienen todas la misma forma. Se utilizan siempre factores de escala $s > 0$. Las Wavelets son dilatadas cuando la escala $s > 1$ y son contraídas cuando $s < 1$. Así, cambiando el valor de s se cubren rangos diferentes de frecuencias. Valores grandes del parámetro s corresponden a

frecuencias de menor rango, o una escala grande de $\Psi_{a,\tau}(t)$. Valores pequeños de s corresponden a frecuencias de mayor rango o una escala muy pequeña de $\Psi_{a,\tau}(t)$ [40].

Algunas de las aplicaciones más frecuentes en las que se emplea la Transformada Wavelet son: estudio de discontinuidades, representación de singularidades (aplicación a la detección de daño estructural), obtención de información tiempo-frecuencia, obtención de información en imágenes, obtención de información para análisis de perturbaciones electromagnéticas presentes en la señal de tensión y corriente, entre otras.

Por otro lado la WT, se divide en tres tipologías diferentes: continua (CWT), semi-discreta (SDWT) y discreta (DWT). La diferencia entre ellas radica principalmente en la forma en la que los parámetros translación y escala son tratados [40].

Aunque anteriormente se han realizado estudios referentes a perturbaciones armónicas presentes en Mdl [41], [42], [43], [44], [45] empleando la WT

como herramienta matemática de análisis; en la figura 6 se presenta una línea de tiempo donde se enfatizan algunas de las publicaciones científicas más relevantes en los últimos años sobre el uso de la WT para la detección y análisis de perturbaciones armónicas presentes en accionamientos eléctricos de control de velocidad.

En [46] se expone una nueva metodología para la supervisión de fallas y diagnóstico de armónicos en Mdl, utilizando la Transformada Wavelet y la Red Neuronal Wavelet como herramientas. El método de diagnóstico se basa en el análisis espectral de la corriente del estator. Este método combina la Transformada Rápida de Fourier (FFT), la Transformada Wavelet (WT) y la Red Neuronal Wavelet (WNN), demostrando que este nuevo enfoque es eficaz para la detección de fallas en el rotor. En [47] utilizan un método para la detección de barras rotas en Mdl, basado en la WT y en el análisis de la corriente del estator. Emplean la Transformada Wavelet Continua (CWT) para la extracción específica de componentes de frecuencia que permitan examinar este tipo de falla en un Mdl. Los resultados experimentales

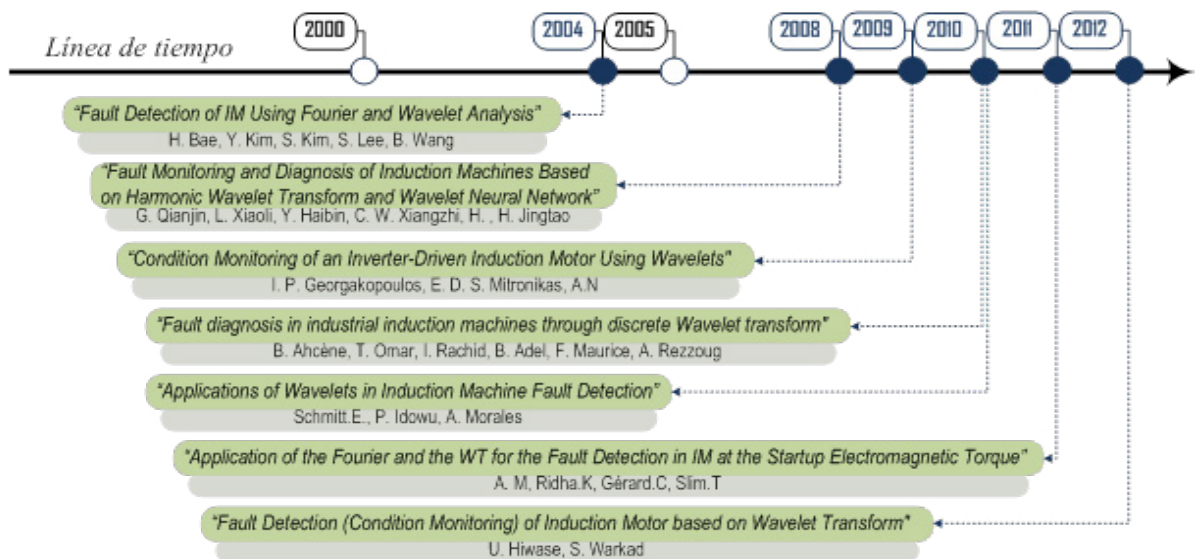


Figura 6. Estudios publicados en el mundo sobre el uso de WT en la detección y análisis de armónicos presentes en accionamientos eléctricos de control de velocidad.

obtenidos confirmaron la capacidad de la técnica propuesta para identificar, bajo diferentes condiciones de velocidad, componentes armónicos característicos debidos a la rotura de barras en Mdl.

En [48] se aborda el diagnóstico de fallas en Mdl utilizando la Transformada Wavelet discreta (DWT). Seleccionan como Wavelet madre “la Wavelet Daubechies” con la cual realizan un barrido de la señal en los dominios de tiempo y frecuencia alcanzando resultados óptimos en la detección de fallas eléctricas del estator y rupturas del rotor. En [49] presentan un nuevo algoritmo basado en wavelets para la detección de fallas en el Mdl. Este nuevo método utiliza la desviación estándar de los coeficientes wavelet, que se obtiene de la descomposición de n-niveles de cada fase, para identificar fallas en el voltaje en una fase o fallas en la resistencia del estator en máquinas de inducción. El algoritmo propuesto puede funcionar independiente de la frecuencia de operación, tipo de falla y condiciones de carga. Los resultados muestran que este algoritmo tiene una mejor respuesta de detección que las técnicas basadas en la Transformada de Fourier.

Asimismo, en [50], [51] proponen un método para el diagnóstico de fallas que se puedan presentar en el rotor de un Mdl. Este método consiste en analizar la corriente del estator, empleando para ello, la FT y la DWT. La aplicación de estas dos herramientas matemáticas permite extraer de manera óptima las características predeterminadas del motor en diferentes condiciones operativas. Por otra parte, en [52] se aplican diferentes técnicas para el análisis del espectro de frecuencia de señal de corriente estacionaria, esto con el propósito de detectar armónicos característicos que se pueden presentar durante una falla en los Mdl. Entre las metodologías expuestas para el análisis estacionario se encuentra el MCSA (Motor Current Signature Analysis) y el EPVA (Extended Park’s Vector Approach). Este artículo propone, además, una nueva técnica para el análisis transitorio de la señal, que consiste en

una combinación de la EPVA y la Transformada Wavelet discreta, la cual permite obtener mejores resultados en la detección de fallas eléctricas del motor de inducción tanto en estado transitorio como estacionario.

3. ANÁLISIS

En este artículo se presenta una revisión detallada que permite poner en evidencia algunos de los trabajos de investigación más representativos de los últimos años, sobre el uso de técnicas de procesamiento de señales para el análisis de la distorsión armónica generada por variadores de frecuencia en motores de inducción con rotor jaula de ardilla. Las técnicas de procesamiento de señales consideradas en este documento fueron: la Transformada de Fourier (FT), la Transformada en Tiempo Corto de Fourier (STFT) y la Transformada Wavelet (WT). En cuanto a la FT las referencias consultadas coinciden en que esta técnica de procesamiento genera buenos resultados cuando las señales son estacionarias; pero cuando estas son no estacionarias la información que se obtienen no es suficiente. Por ende se debe recurrir al uso de técnicas de procesamiento tiempo frecuencia como la STFT y la WT. La STFT evalúa la señal a través de una ventana de análisis supliendo la falencia de la FT; no obstante, esta ventana una vez elegida, es la misma para analizar todas las frecuencias de la señal. Puesto que muchas señales requieren flexibilidad y precisión cuando se quieren analizar ciertos componentes de frecuencia se recurre al uso de la WT que suple la falencia de la FT, respecto al análisis de señales no estacionaria y de rápida transitoriedad y suple la falencia de la ventana de análisis de la STFT, ya que utiliza una ventana de análisis que se adapta a las características propias de la señal teniendo una muy buena resolución tiempo frecuencia de manera simultánea. Finalmente, en la tabla 1 se resumen de forma comparativa las principales características de las técnicas de procesamiento estudiadas en este artículo para el tratamiento de señales.

	Transformada de Fourier (FT)	Transformada rápida de Fourier (STFT)	Transformada Wavelet (WT)
<i>Funciones base</i>	senos y cosenos	cosenos	Wavelets
<i>Tipo de señal analizada</i>	estacionarias	estacionarias y no estacionarias	estacionarias y no estacionarias
<i>Ventana de análisis</i>	No	Si, longitud fija (no se adapta a las características propias de la señal)	Si, longitud variable (se adapta a las características propias de la señal)
<i>Complejidad de cálculo</i>	sencillo	complejo	muy complejo
<i>Detección de singularidades de la señal</i>	baja	media	alta
<i>Capacidad de reconstruir la señal</i>	baja	media	alta
<i>grado de utilización actual</i>	alto	escaso	muy escaso
<i>detección de armónicos</i>	bueno	muy bueno	excelente
<i>software para la implementación en tiempo real</i>	básico	complejo	muy complejo

Tabla 1. Comparación de las principales características de las técnicas de procesamiento de señal tratadas.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con los trabajos de investigación consultados, se puede evidenciar el creciente interés en los últimos años por el estudio de perturbaciones armónicas presentes en accionamientos eléctricos de control de velocidad compuestos por variadores de frecuencia (VFD) y motores de inducción (Mdl). Sin embargo, existen aún algunos tópicos sin explorar, como es el caso de los motores de inducción de alta eficiencia y eficiencia Premium, de los cuales no se destacan investigaciones recientes para evaluar el contenido armónico que estos motores generan a la red de suministro eléctrico. Tampoco se destacan estudios que realicen un análisis comparativo de la distorsión armónica generada por accionamientos eléctricos de control de velocidad constituidos por motores de eficiencia estándar y motores alta eficiencia y eficiencia Premium, utilizando como herramienta de análisis

las diferentes técnicas de procesamiento de señales (Transformada en Tiempo Corto de Fourier, Transformada Wavelet). Asimismo, no se destacan investigaciones sobre las características electromecánicas de motores de alta eficiencia respecto a motores de eficiencia estándar y su impacto desde el punto de vista de calidad de potencia. Los diferentes métodos de monitoreo y diagnóstico de fallas han sido ampliamente utilizados y evaluados en motores de inducción de propósito general, no obstante, ante la creciente utilización de motores de alta eficiencia y eficiencia Premium, sería pertinente contar con investigaciones que evaluaran la respuesta de las diferentes técnicas de monitoreo y diagnóstico de fallas en motores de alta eficiencia y eficiencia Premium. Por otra parte, la gran mayoría de investigaciones utilizan cargas controladas para realizar los estudios respectivos. Sin embargo, cabe resaltar que en el sector industrial existen un sin número de cargas que tiene un comportamiento no lineal

y con las cuales se podría evaluar la respuesta en tiempo real de las diferentes técnicas de monitoreo y diagnóstico desarrolladas para la detección de fallas en motores de inducción.

5. AGRADECIMIENTOS

Este artículo fue desarrollado en el proyecto de investigación "Efecto de las perturbaciones en la calidad de energía eléctrica sobre el motor de inducción trifásico. Etapa I: Huecos de tensión, sistemas de tensiones desequilibrado y generación de armónicos" cuyo investigador principal es el doctor Adolfo Andrés Jaramillo, perteneciente al grupo de investigación LIFAE (Laboratorio de Investigación en Fuentes Alternativas de Energía) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, aprobado por el centro de investigación y desarrollo científico, CIDC, bajo convocatoria 008 de 2013.

6. REFERENCIAS

- [1] L. Peñalba and J. Pardo, "Gestión Energética de los motores eléctricos: mejora de la eficiencia de los accionamientos con el uso de variadores de velocidad". *Santander, España: Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, E.T.S.I.I. y T., Universidad de Cantabria*, p. 8, Consultado el 19 de diciembre de 2014 .
- [2] M. Castelli, J. Fossati and M. Andrade, "Metodología de monitoreo, detección de fallos y diagnóstico en motores asíncronos". *IEEE, 7º encuentro de Energía, Potencia, Instrumentación y Medidas*, pp. 91-98, 2008.
- [3] WEG, Guía Técnica-Motores de inducción alimentados por convertidores de frecuencia PWM, 2010, [en línea], Consultado el 8 de enero de 2015, disponible en: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-de-induccion-alimentados-por-convertidores-de-velocidad-pwm-029-articulo-tecnico-espanol.pdf>
- [4] Sekar, T.C. and Rabi, B.J. "A Review and Study of Harmonic Mitigation Techniques". *Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (ICETEEEM)*, 2012 International Conference on, vol., no., pp.93-97, 2012, doi: 10.1109/ICETEEEM.2012.6494450.
- [5] Reid, W.E. "Power Quality ISSues-Standards and Guidelines". *IEEE Transactions on Industry Applications Conference*, vol. 32, pp. 625-632, 1996, doi: 10.1109/28.502175.
- [6] CIRCUTOR, *Procedimientos para el estudio y análisis de perturbaciones armónicas*. Viladecavalls -España, p. 20, 2009.
- [7] C. Torres, *Análisis, descripción y comparación de los métodos de Fourier y Wavelet aplicados a la identificación de características dinámicas en estructuras*. Tesis de pregrado, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, Facultad de físico-mecánicas, 2011.
- [8] N. Nieto and D. Orozco, "The use of the discrete Wavelet transform in the reconstruction of sinusoidal signals". *Scientia et Technica-XIV*, vol. 38, pp. 381-386, 2008.
- [9] L. Martínez, *Computación paralela de la transformada Wavelet; aplicaciones de la Transformada Wavelet al álgebra lineal numérica*. Tesis Doctoral, Valencia, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Sistemas Informáticos, 2009.
- [10] O. Rioul and M. Vetterli, "Wavelets and Signal Processing". *IEEE SP Magazine*, vol. 8, pp. 14-38, 1991.
- [11] E. Rivas, *Detección de averías en cambiadores de tomas en carga de transformadores basado en el patrón de vibraciones*. Tesis doctoral, Madrid, Universidad Carlos III Departamentos de ingeniería eléctrica e ingeniería mecánica, 2009.
- [12] A. Ferrah, K. Bradley and G. Asher, "Application of the FFT to the speed measurement of inverter fed induction motors". *Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC '92), 9th IEEE*, pp. 647-652, 1992, doi: 10.1109/IMTC.1992.245059.
- [13] A. Ferrah, K. Bradley and G. Asher, "Sensorless speed detection of inverter fed induction

- motors using rotor slot harmonics and fast fourier transform". *Power Electronics Specialists Conference, IEEE*, vol. 1, pp. 279-286, 1992.
- [14] R. Blasco, M. Sumner and G. M. Asher, "Speed measurement of inverter fed induction motors using the FFT and the rotor slot harmonics". *Power Electronics and Variable-Speed Drives, 1994. Fifth International Conference on*, vol., no., pp.470-475, 1994 doi: 10.1049/cp:19941011.
- [15] R. Blasco-Giménez, G. Asher, M. Sumner and K. Bradley, "Performance of FFT-rotor slot harmonic speed detector for sensorless induction motor drives". *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, vol. 43, pp. 258-268, 1996, doi: 10.1049/ip-epa:19960241.
- [16] M. Benbouzid, H. Nejjari, R. Beguenane and M. Vieira, "Induction Motor Asymmetrical Faults Detection Using Advanced Signal Processing Techniques". *Energy Conversion, IEEE*, vol. 14, pp. 147-152, 1999, doi: 10.1109/60.766963.
- [17] B. Ayhan, M.-Y. Chow, H. Trussell and M.-H. Song, "A case study on the comparison of non-parametric spectrum methods for broken rotor bar fault detection". *Industrial Electronics Society, IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE*, vol. 3, pp. 2835-2840, 2003, doi: 10.1109/IECON.2003.1280697.
- [18] L. Dimitrov and V. Chobanov, "Diagnosis of rotor faults of induction motors, operated in non-rated conditions". *Electronics Technology: Meeting the Challenges of Electronics Technology Progress*, vol. 1, pp. 110-113, 2004, doi: 10.1109/ISSE.2004.1490387.
- [19] F. Ruiming and M. Hongzhong, "Application of MCSA and SVM to Induction Machine Rotor Fault Diagnosis". *Intelligent Control and Automation, WCICA 2006. The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation*, vol. 2, pp. 5543-5547, 2006.
- [20] K. Siddiqui and V. Giri, "Broken Rotor Bar Fault Detection in Induction Motors using Transient Current Analysis". *International Journal on Electronics & Communication Technology (IJECT)*, vol. 2, pp. 114-119, 2011.
- [21] K. Gaeid, H. Ping, M. Khalid and A. Salih, "Fault Diagnosis of Induction Motor Using MCSA and FFT". *Electrical and Electronic Engineering*, 1 (2), pp. 85-92, 2011, doi: 10.5923/j.eee.20110102.14.
- [22] M. Castelli, J. Fossati and M. Andrade, "New Methodology to Faults Detection in Induction Motors via MCSA". *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, IEEE/PES*, pp. 1-6, 2008, doi: 10.1109/TDC-LA.2008.4641817.
- [23] D. Hwang, Y. Youn, J. Ho Sun and Y. Hwa Kim, "Robust Diagnosis Algorithm for Identifying Broken Rotor Bar Faults in Induction Motors". *Journal of Electrical Engineering & Technology (JEET)*, vol. 8, pp. 742-749, 2013.
- [24] M. Armaki and R. Roshanfekr, "A New Approach for Fault Detection of Broken Rotor Bars in Induction Motor Based on Support Vector Machine". *Electrical Engineering (ICEE)*, pp. 732 -738, 2010, doi: 10.1109/IRANIAN-CEE.2010.5506976.
- [25] C. Marcelo, J. Fossatti and J. Terra, "Fault Diagnosis of Induction Motors Based on FFT". *Fourier Transform -Signal Processing*, ISBN: 978-953-51-0453-7, In Tech, Uruguay, Dr Salih Mohammed Salih (Ed.), pp.157-182, 2012.
- [26] B. Biswas, S. Das, P. Purkait, M. Mandal and D. Mitra, "Current Harmonics Analysis of Inverter-Fed Induction Motor Drive System under Fault Conditions". *Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists (IMECS)*, vol. 2, pp. 1-5, 2009.
- [27] M. Mehrotra and A. Pandey, "Harmonics analysis of VSI fed induction motor drive". *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, vol. 5, pp. 36-40, 2012.
- [28] J. Cortes, F. Medina and J. Chaves, "Del análisis de Fourier a las Wavelets, análisis de Fourier". *Scientia et Technica-XIII*, vol. 34, pp. 151-156, 2007.

- [29] N. Mehala and R. Dahiya, "Condition monitoring methods, failure identification and analysis for Induction machines". *International journal of circuits, systems and signal processing*, vol. 3, pp. 10-17, 2009.
- [30] A. Zayed, I., "Hilbert transform associated with the fractional fourier transform". *Signal Processing Letters, IEEE*, vol. 5, pp. 206 -208, 1998, doi: 10.1109/97.704973.
- [31] S. Mallat, "Wavelet Tour on Signal Processing". In *Academic Press*, Second edition, pp. 220-314, 1999.
- [32] E. Strangas, S. Aviyente and S. Zaidi, "Time-Frequency Analysis for Efficient Fault Diagnosis and Failure Prognosis for Interior Permanent-Magnet AC Motors". *Industrial Electronics, IEEE*, vol. 55, pp. 4191-4199, 2008.
- [33] N. Mehala and R. Dahiya, "A Comparative Study of FFT, STFT and Wavelet Techniques for Induction Machine Fault Diagnostic Analysis". *CIMMACS'08 Proceedings of the 7th WSEAS international conference on Computational intelligence, man-machine systems and cybernetics*, pp. 203-208, 2009.
- [34] K. Siddiqui and V. Giri, "Broken Rotor Bar Fault Detection in Induction Motors using Transient Current Analysis". *International Journal on Electronics & Communication Technology (IJECT)*, vol. 2, pp. 114-119, 2011.
- [35] H. Arabacı and O. Bilgin, "Effects of Rotor Faults in Squirrel-Cage Induction Motors on The Torque-speed curve". *XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Rome, pp. 1-5, 2010.
- [36] J. García, E. García and J. Romeral, "Failure Detection In Induction Machines Based On Wavelet Transform And STFT". *Visión Electrónica: algo más que un estado sólido, [S.l.]*, vol. 5, pp. 38-47, 2011.
- [37] S. Taskin and H. Gokozan, "Determination of the Spectral Properties and Harmonic Levels for Driving an Induction Motor by an Inverter Driver under the Different Load Conditions". *Electronic & Electrical Engineering*, pp. 75-80, 2011, ISSN: 1392-1215.
- [38] E. Luna-Gómez, D. Silva and G. Aponte, "Selection of a mother wavelet for frequency analysis of transient electrical signals using WPD". *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 21, pp. 262-270, 2013.
- [39] E. Serrano, "Introducción a la Transformada Wavelet y sus aplicaciones al procesamiento de señales de emisión acústica". *Escuela de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de General San Martín*, p. 15, 2002.
- [40] R. Reyes, *Aplicación de la Transformada wavelet en el análisis de calidad de la energía*. México, Instituto Politécnico Nacional, Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica unidad profesional Adolfo López Mateos, 2009.
- [41] Q. Xiu, L. Hai-Lian and D. Guang-Jin, "The fault-character of the motors identified based on Wavelet transform". *Machine Learning and Cybernetics, IEEE*, vol. 4, pp. 2394-2398, 2003, doi: 10.1109/ICMLC.2003.1259911.
- [42] M. Aerhpanahi, S. Sadeghi and A. Roknabadi, "Broken Rotor Bar Detection in Induction Motor via Stator Current Derivative". *Industrial Technology, IEEE*, vol. 3, pp. 1363-1367, 2004, doi: 10.1109/ICIT.2004.1490759.
- [43] Department of Electrical and Computer Engineering Energy Systems Laboratory, "Modeling and Characterization of Induction Motor Internal Faults Using Finite-Element and Discrete Wavelet Transforms". *Electric Ship Technologies Symposium, (ESTS)*, pp. 250-253, 2006.
- [44] A. Daviu, M. Riera, J. Folch and P. Molina, "Validation of a New Method for the Diagnosis of Rotor Bar Failures via Wavelet Transform in Industrial Induction Machines". *IEEE Transactions on*, vol.42, no.4, pp.990-996, 2006, doi: 10.1109/TIA.2006.876082.
- [45] L. Cusido, A. Romeral, J. García, J. Rosero and A. Ortega, "Fault detection in Induction Machines by using Continuous and Discrete Wa-

- velet Decomposition". *Power Electronics and Applications, IEEE*, p. 8, 2007, doi: 10.1109/EPE.2007.4417512.
- [46] G. Qianjin, L. Xiaoli, Y. Haibin, C. W. Xiangzhi and H. Jingtao, "Fault Monitoring and Diagnosis of Induction Machines Based on Harmonic Wavelet Transform and Wavelet Neural Network". *Natural Computation, ICNC '08. Fourth International Conference, IEEE*, vol. 4, pp. 140-146, 2008, doi: 10.1109/ICNC.2008.663.
- [47] I. Georgakopoulos and E. Mitronikas, "Condition Monitoring of an Inverter-Driven Induction Motor Using Wavelets". *Advanced Electromechanical Motion Systems & Electric Drives Joint Symposium, Electromotion, CFP0910I-ART*, pp. 1-5, 2009, doi: 10.1109/ELECTROMOTION.2009.5259128.
- [48] B. Ahcène, T. Omar, I. Rachid, B. Adel, F. Maurice and A. Rezzoug, "Fault diagnosis in industrial induction machines through discrete Wavelet transform". *Industrial Electronics, IEEE*, vol. 58, pp. 4385-4395, 2010, doi: 10.1109/TIE.2010.2095391.
- [49] E. Schmitt, P. Idowu and A. Morales, "Applications of Wavelets in Induction Machine Fault Detection". *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 18, pp. 158-164, 2010.
- [50] H. Bae, Y. Kim, S. Kim, S. Lee and B. Wang, "Fault Detection of Induction Motors Using Fourier and Wavelet Analysis". *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, vol. 8, pp. 431-432, 2004.
- [51] Menacer, A. Kechida, R. Champenois, G. Tnani, S. "Application of the Fourier and the Wavelet Transform for the Fault Detection in Induction Motors at the Startup Electromagnetic Torque". *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED)*, pp. 664-668, 2011, doi: 10.1109/DEMPEP.2011.6063695.
- [52] U. Hiwase and S. Warkad, "Fault Detection (Condition Monitoring) of Induction Motor based on Wavelet Transform". *International Journal of Electrical and Electronics Engineering (IJEEE)*, vol. 1, pp. 97-100, 2012.

