

# DetECCIÓN DE PÉRDIDAS DE AISLAMIENTO EN UN MOTOR DE INDUCCIÓN BASADO EN EL ANÁLISIS DE LA TRANSFORMADA WAVELET APLICADA AL FLUJO DE DISPERSIÓN MAGNÉTICO

**Antonio Alexi Anteliz Jaimes**  
Especialista en Docencia Universitaria  
Ingeniero Electricista  
Docente Investigador UTS  
Grupo de investigación CEAC  
Unidades Tecnológicas de Santander  
anteliz3@hotmail.com  
Colombia

**Resumen—** El presente trabajo muestra los resultados en la detección fallas instantáneas (pérdidas de aislamiento) ocurridas en un motor de inducción trifásico y su detección mediante la información presente en el flujo de dispersión magnético a través de la transformada Wavelet. Normalmente las pérdidas de aislamiento entre bobinas de la misma fase o de fases diferentes en sus estados tempranos de desarrollo generan transitorios de corta duración que no son fácilmente detectables, transitorios que normalmente terminan por dejar la máquina fuera de servicio. La transformada Wavelet permite hacer un barrido sobre una señal en frecuencia y tiempo, lo que permite identificar fallas o perturbaciones de forma clara y precisa, para detectar y diagnosticar fallas en estados tempranos de desarrollo.

**Palabras clave—** Diagnóstico, Fallas, Flujo, transitorio. Wavelet.

**Abstract—** Present work evidences the aftermath in the detection instant faults ( losses of isolation ) occurred in a motor of three-phase induction and his intervening detection the present information in the flow of magnetic dispersion through the transformed wavelet. Normally the losses of isolation among bobbins of same phase or of different phases in his premature statuses of development generate transient short-lived that they are not easily detectable, transient that normally they end up shutting out the machine on duty. The transformed Wavelet permits to do a sweeping on a sign in frequency and time, that permits identifying faults or disturbances of obvious form and needs to, diagnosing with it to detect faults in premature statuses of development

**Keywords—** Diagnosis, Faults, Flow, transient, Wavelet

## I. INTRODUCCIÓN

El motor de Inducción se ha convertido en las últimas décadas en la máquina de mayor uso insta-

lándose en el corazón de los procesos productivos, de tal forma que garantizar su funcionamiento se ha hecho esencial para mantener la eficiencia y confiabilidad de los procesos en los cuales se encuentra inmerso. Los planes de mantenimiento que en épocas anteriores se orientaban hacia el mantenimiento correctivo y preventivo, se han desplazado hacia el mantenimiento predictivo o monitoreo on line (en línea)[1],[2].

El motor de inducción sea este de rotor jaula de ardilla o rotor devanado es una máquina estable, confiable, de alto desempeño y bajo costo de mantenimiento, sin embargo, es susceptible de sufrir daños eléctricos y/o mecánicos ocasionados por diferentes factores [3], [4]. Análisis estadísticos sobre las diferentes fallas que se presentan en las máquinas de Inducción han mostrado que cerca de 40% corresponde a averías de origen mecánico que normalmente involucran los rodamientos y desviaciones en el eje, entre el 30% y el 40% son de origen eléctrico que involucran fallas en el estator relacionadas con el debilitamiento del aislamiento del conductor ocasionado por fuentes de alimentación desbalanceadas, presencia de componentes armónicas en la red, presencia de transitorios de voltaje en los sistemas de alimentación (swells y sags) y contaminación ambiental del circuito eléctrico del motor, que ocasionan cortocircuitos entre espiras de la misma fase, cortocircuitos entre fases y cortocircuitos entre conductores y circuito magnético (estator), las fallas eléctricas en el rotor equivalen a un 10% y se relacionan con daños en el barraje del rotor o en los anillos de cortocircuito y, finalmente, un 10% se relacionan

con otras fallas entre las que se incluyen los errores humanos[5].

El mantenimiento predictivo, cuyo objetivo se centra en la detección de fallas en estados incipientes de desarrollo se ha visto fortalecido con la aparición de las novedosas técnicas de tratamiento digital de señales que ha hecho posible el análisis de las variables eléctricas y mecánicas on line (en línea) mediante el uso de la Transformada Discreta de Fourier [6], [7], [8] y la recientemente incorporada Transformada Wavelet [9], [10], [11]. La aplicación de las técnicas de tratamiento digital de señales que proporcionan alta resolución espectral unida a transductores, equipos y software de bajo costo, ha transformado paulatinamente el mantenimiento tradicional (preventivo y correctivo) hacia el mantenimiento predictivo. Dichas técnicas ofrecen la posibilidad de realizar diagnóstico del estado de la máquina, mediante la monitorización continua de las diferentes variables eléctricas o mecánicas sin interrumpir el proceso productivo en el cual se opera, y detectando fallas en estados incipientes de desarrollo.

## II. REFERENTE TEÓRICO

### A. Flujo Magnético de Dispersión en los Motores de Inducción

El motor de inducción trifásico normalmente se construye sobre un circuito magnético cilíndrico, en el cual se disponen tres devanados o bobinas simétricamente distribuidas y separadas a 120° físicos. Cuya función es la creación de un flujo magnético que gira a través del circuito magnético (estator), este campo es creado cuando los bobinados del motor son alimentados mediante un sistema trifásico de voltajes, quienes a su vez crean tres corrientes eléctricas de igual magnitud pero separadas en el tiempo, a su vez, dichas corrientes crean tres campos magnéticos, uno para cada fase y que se confinan dentro del circuito magnético de la máquina, y giran a velocidad síncrona.

La parte del flujo magnético creado se concentra dentro del circuito magnético dispuesto para ello, sin embargo debido a factores tales como la dificultad de construir máquinas perfectamente simétricas, asimetrías en los circuitos eléctricos y magnéticos del motor (asimetrías en la disposi-

ción de las bobinas y de las ranuras), y anisotropías propias de los materiales con los cuales es construida la máquina, aparece un flujo de dispersión que circula por la parte externa del circuito magnético. El flujo magnético presente en un motor de inducción es el pilar fundamental para explicar su funcionamiento, en consecuencia existe una relación directa entre la información presente en flujo magnético y el estado funcional de la máquina, por consiguiente, la información presente en el flujo de dispersión magnético se convierte en un indicador confiable para evaluar y predecir el estado actual de la máquina.

### B. Transformada Wavelet

La transformada Wavelet de una señal cualquiera se construye a partir de una función wavelet madre caracterizada por ser asimétrica e irregular, de duración finita y con valor promedio cero [12], [13], [14]. La función Wavelet se puede comprimir o expandir y desplazar en el tiempo para realizar análisis generales o localizados en una señal objeto de estudio, por lo que brinda la posibilidad de encontrar características específicas, discontinuidades, picos o fluctuaciones de corta duración presentes, que mediante técnicas de caracterización espectral son difíciles o imposibles de localizar y analizar.

La fundamentación teórica de análisis Wavelet se desarrolla de manera similar al análisis de Fourier, en donde una señal se descompone en múltiples señales wavelets desplazadas y comprimidas o expandidas cuya sumatoria total es la señal original. Las Wavelets son familias de funciones que se desplazan, comprimen o expanden a partir de una función original o comúnmente llamada Wavelet madre, pero todas tienen la misma forma, matemáticamente se expresa como:

$$h_{a,b} = \frac{h\left(\frac{x-b}{a}\right)}{\sqrt{|a|}}; a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0 \quad (1)$$

a representa el factor de compresión  
b representa el factor de desplazamiento

Función wavelet

La Ecuación 1 muestra señales Wavelet originales y comprimidas que se trasladan en el tiempo, y hacen un barrido sobre una señal objeto de estudio; de esta forma se puede ampliar o contraer

la señal para percibir detalles o características generales, esta particularidad de la transformada wavelet ha hecho que se considere como un “microscopio matemático”. La Transformada Wavelet establece una relación entre una señal  $f(t)$  y una familia de funciones Wavelet  $h(t)$  comprimidas o expandidas y desplazadas, mediante los llamados coeficientes Wavelets, que son proporcionales al producto interno entre la señal y la familia Wavelet escalada (comprimida o expandida) y desplazada.

Existen dos tipos generalizados de transformada Wavelet, la transformada Wavelet continua y la transformada Wavelet discreta, la aplicación de cada una de ellas se relaciona directamente con la señal objeto de estudio y sus patrones o rangos de interés. Elegir la aplicación de la transformada Wavelet continua (cwt), o la transformada Wavelet discreta (dwt), se relaciona directamente con la calidad espectral y temporal que se desee obtener de la variable objeto de estudio. Una mayor resolución espectral permite identificar y localizar eventos de corta duración, reconocer texturas o realzar detalles. Naturalmente la complejidad de las operaciones, y, los costos computacionales son superiores en la transformada Wavelet continua.

La Transformada Wavelet Continua matemáticamente se expresa en la ecuación (2), donde  $a$  representa el escalamiento de la Wavelet (compresión o expansión) y  $b$  el desplazamiento de la señal, básicamente la CWT hace un barrido sobre la señal a diferentes escalas desplazándola por toda la señal, y calcula un coeficiente que establece una relación entre la función wavelet y la señal objeto de estudio.

$$CWT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) h\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

$x(t)$  Señal objeto de estudio  
 $h\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$  familia wavelet

(2)

Los coeficientes wavelets  $C$  son función del factor de escala  $a$  y del factor de desplazamiento  $b$ , que son almacenados en una matriz de  $C(N*L)$ , en donde  $N$  es el número de escalas y  $L$  la longitud de la señal.

### III. METODOLOGÍA

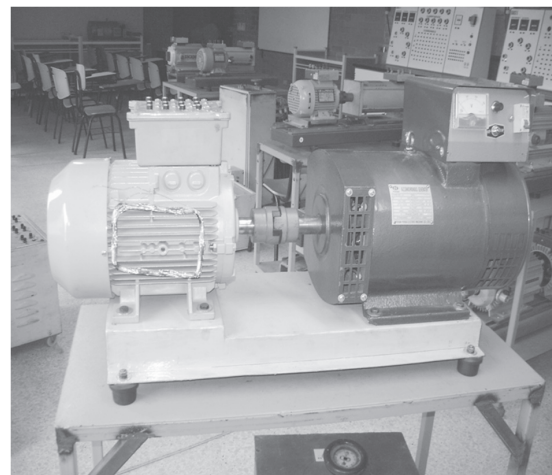
Frente al desarrollo de la investigación se pretende cuantificar la relación existente entre las condiciones normales de operación (variables de entrada y salida) de un motor de inducción y el flujo magnético de dispersión mediante el análisis en el dominio Wavelet. De otra parte se efectuarán fallas transitorias controladas (cortocircuitos de corta duración) en uno de los devanados de campo del motor, fallas que se estudiarán con la CWT, para ello se tomarán datos de las diferentes variables eléctricas y magnéticas involucradas bajo diferentes condiciones de operación de la máquina.

#### A. Adquisición de la señal de flujo magnético de dispersión

El sensor de campo es una bobina construida con 150 espiras en alambre de cobre AWG 28, y cuyas características en forma, tamaño y número de espiras dependen de cada motor en particular. La bobina debe cubrir un área que involucre varias ranuras del estator para que la señal de flujo sea un reflejo exacto del campo magnético giratorio creado por el sistema trifásico de alimentación del motor. La tensión inducida en la bobina está directamente relacionada con el flujo a través de la ley de inducción magnética

El sensor de campo se ha ubicado en la parte radial de la carcasa del motor de inducción jaula de ardilla, tal como lo muestra la Figura 1.

FIG. 1. ESQUEMA GENERAL MOTOR, SENSOR Y CARGA



De manera general el sistema de alimentación de energía alterna en nuestro medio se caracteriza por tener una frecuencia normalizada en 60 Hz,

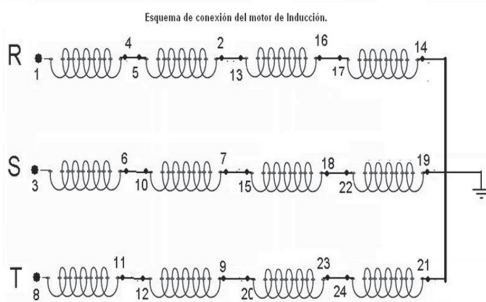
(permitiéndose un rango de variación entre 59.7 Hz y 60.3 Hz, o, entre 57 Hz y 63 Hz en casos especiales), y presenta armónicos de tercer, quinto y séptimo orden (180, 300 y 420 Hz).

Obtener una secuencia de datos que permita aplicar de manera confiable las técnicas de tratamiento digital de señales requiere que los datos sean obtenidos según el teorema de Nyquist, que define la frecuencia de muestreo debe ser como mínimo el doble de frecuencia de la señal a muestrear. La señal ha sido muestreada a 5000 Hz, frecuencia superior a la recomendada por criterio de Nyquist, sin embargo, aumentar la frecuencia de muestreo permite reducir el error de cuantización, el cual se manifiesta durante el proceso de conversión análoga digital, dado que no solamente se discretiza en tiempo, sino que la amplitud de la señal también se ve discretizada. Específicamente la cuantización es un indicador que describe la diferencia en amplitud entre el valor real de la señal y el valor discretizado de la misma.

El sensor (bobina) de flujo de dispersión se ha ubicado en la parte externa del circuito magnético de tal forma que perciba la presencia del flujo de dispersión, y haga una conversión de la señal de campo magnético en señal de tensión eléctrica.

El motor de inducción trifásico utilizado marca siemens, con especificaciones generales de 60 Hz, 220/380V, 5HP, 1740 rpm, consta de 4 bobinas por fase en conexión estrella, tal como se muestra en el esquemático de la Figura 2. La primera parte de la toma de datos involucra la operación del motor bajo diferentes condiciones de carga en condiciones normales de operación.

FIG. 2. ESQUEMA DE CONEXIONES DEL MOTOR DE INDUCCIÓN



### B. Falla controlada transitoria

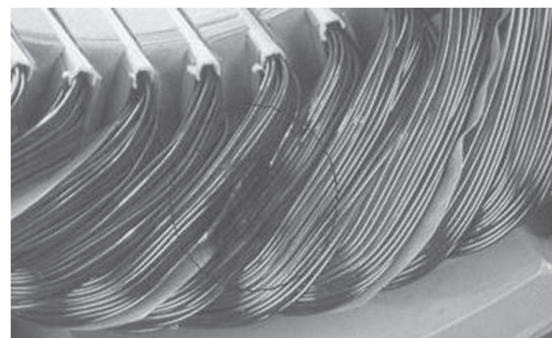
La falla controlada, que físicamente consiste en realizar un corto circuito momentáneo, en los ter-

minales de la bobina 2-5, (ver Fig. 2). Este fallo permite simular condiciones iniciales de fallas relacionadas con el deterioro del aislamiento en los conductores eléctricos de las bobinas, estas pérdidas de aislamiento se pueden dar entre espiras de la misma fase, espiras de fases diferentes o entre carcasa y bobina.

La Figura 3 muestra un fallo ocurrido por pérdidas de aislamiento entre espiras de la misma fase, lo que ocasiona con ello un fallo general en el motor, normalmente este tipo de fallas comienza con la aparición de pequeñas descargas eléctricas entre espiras, las cuales con el tiempo terminan por aislar completamente la bobina de la cual hacen parte y naturalmente ocasionan la salida del motor del sistema.

La pérdida del aislamiento en los conductores eléctricos del motor puede tener múltiples causas entre las cuales se pueden mencionar: defectos de fabricación en el aislamiento del conductor, daños accidentales en el aislamiento en el proceso de bobinado, impurezas sobre el conductor, presencia de puntos calientes causados por contactos inadecuados o presencia de sobretensiones entre conductores muy cercanos.

FIG. 3. FALLA POR PÉRDIDAS DE AISLAMIENTO ENTRE ESPIRAS DE LA MISMA FASE



Fuente: <http://bobinados.blogspot.com/2007/09/diagnostico-de-fallas-en-los-bobinados.html>

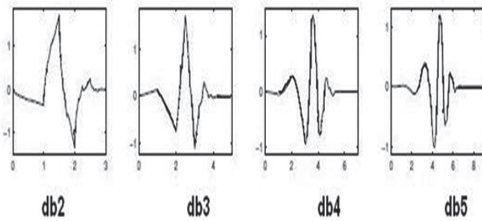
### C. Selección de la función Wavelet

Implementar la Transformada Wavelet Discreta o Continua requiere de la selección adecuada de la familia Wavelet que se va a utilizar, el criterio general indica que se debe seleccionar una familia Wavelet lo más parecida a la señal objeto de estudio para obtener resultados acertados, debido a que la señal de campo objeto de estudio presenta un forma sinusoidal la elección de la familia Wavelet seleccionada fue la familia Daubechies, desa-



rollada por la matemática Belga, Ingrid Daubechies en 1987. La Figura 4 muestra un conjunto de esta familia Wavelet.

FIG. 4. FAMILIA WAVELETS DAUBICHIES

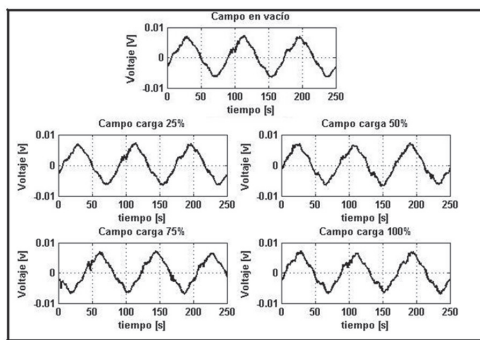


#### IV. TOMA DE DATOS

##### A. Datos obtenidos para el flujo magnético en diferentes condiciones de carga. Condición normal de operación

En esta prueba se toma la información del flujo de dispersión para en motor en diferentes condiciones de operación, el motor es alimentado con un sistema trifásico sinusoidal 220/380 V; el motor está en conexión estrella, las señales de campo magnético son adquiridas para diferentes condiciones de operación, desde operación en vacío hasta operación a plena carga. La Figura 5 muestra los resultados obtenidos para el flujo de dispersión magnético en las diferentes condiciones de carga,

FIG. 5. FLUJO MAGNÉTICO DE DISPERSIÓN PARA DIFERENTES CONDICIONES DE CARGA

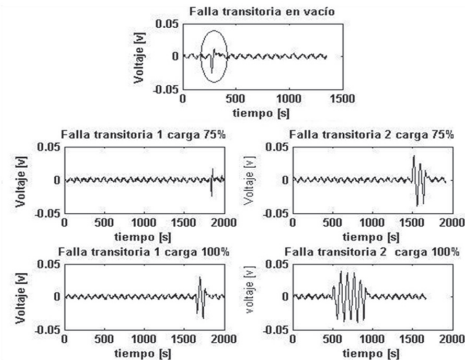


##### B. Datos obtenidos del flujo magnético para fallas transitorias controladas y diferentes condiciones de carga

La falla transitoria controlada se ha efectuado sobre la bobina 2-5, que hace parte del bobinado del motor conectado a la fase R, la cual ha sido

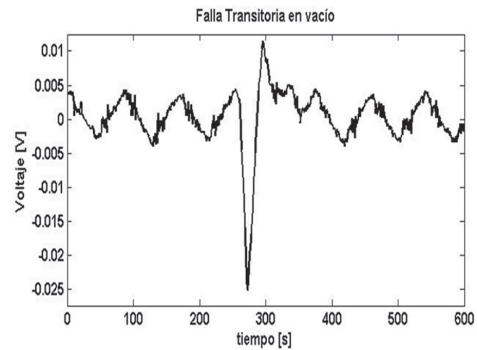
puesta en cortocircuito momentáneo, sin poner en riesgo el motor. La falla se realizó para diferentes condiciones de carga, y se obtuvieron los datos de flujo de dispersión magnética para cada condición. Para las condiciones de operación con carga del 75% y 100% en el motor se han efectuados fallas momentáneas de diferente duración tal como se muestra en la Figura 6.

FIG. 6. FALLAS TRANSITORIAS CONTROLADAS PARA DIFERENTES CONDICIONES DE CARGA



La Figura 7 muestra el acercamiento señalado en la Figura 6, para la falla transitoria en el motor, cuando opera al vacío.

FIG. 7. ACERCAMIENTO PARA LA FALLA TRANSITORIO EN VACÍO

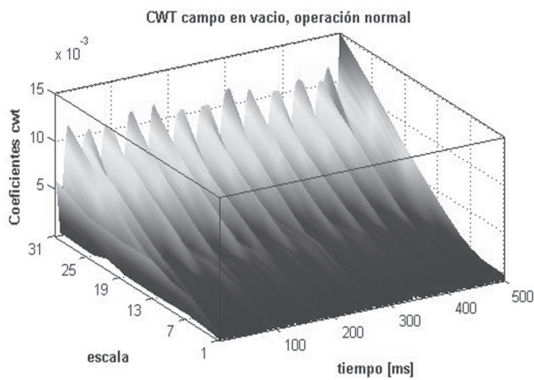


#### V. ANÁLISIS EN EL DOMINIO WAVELET

##### A. Transformada Continua Wavelet para operación en condición normal

Las Figuras 8 y 9 muestran la transformada Wavelet para el motor en diferentes condiciones de operación, se observa la similitud en los resultados de los coeficientes Wavelets para las diferentes condiciones de carga, la Figura 8 muestra la cwt del campo cuando el motor opera al vacío, y la Figura 9, la cwt del campo cuando el motor opera al 100% de su carga nominal.

FIG. 8. CWT DE LA SEÑAL DE CAMPO OPERACIÓN DEL MOTOR EN VACÍO



**B. Transformada continua Wavelet para falla transitoria controlada cuando el motor opera al vacío**

La Figura 10 muestra el análisis en el dominio Wavelet 3D y 2D (vista superior) para la señal de campo tomada cuando el motor opera al vacío y la falla transitoria aplicada al motor; se observa el transitorio ocurrido en la señal (señalado por contorno curvo).

FIG. 9. CWT DE LA SEÑAL DE CAMPO OPERACIÓN DEL MOTOR A PLENA CARGA

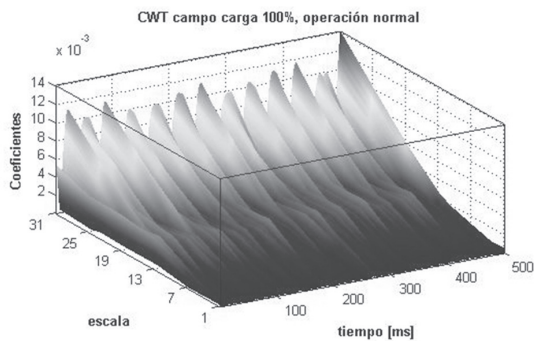
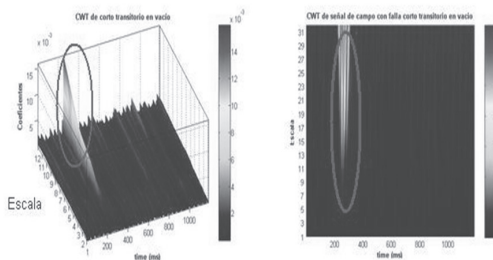


FIG. 10. CWT DE LA SEÑAL DE CAMPO CON FALLA TRANSITORIA CUANDO EL MOTOR OPERA AL VACÍO



La Figura 11, muestra un acercamiento (vista frontal) sobre el momento en el cual se presenta la condición de falla transitoria con una duración

de algunos milisegundos de duración, para luego mostrar la condición normal de operación.

**C. Transformada Wavelet continua para fallas controladas cuando el motor opera al 75% de carga**

En esta condición de operación se han efectuado dos fallas controladas con diferentes tiempos de duración, Tal como se observa en las Figuras 12 y 13, la CWT correspondiente a las fallas transitorias mostradas en la Figura 6. La presencia de la perturbación transitoria se refleja en la Gráficas 3D y 2D (vista superior).

FIG. 11. ACERCAMIENTO DE LA FIG. 10

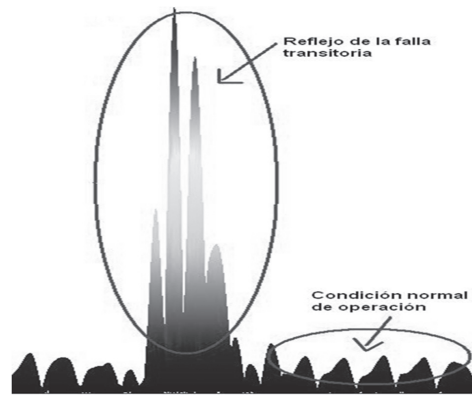


FIG. 12. CWT DE LA SEÑAL DE CAMPO CON FALLA TRANSITORIA 1, MOTOR OPERANDO CON EL 75% DE LA CARGA.

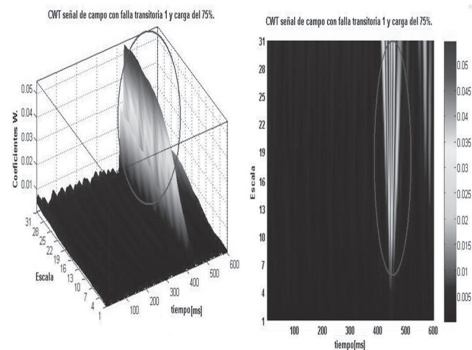


FIG. 13. CWT DE LA SEÑAL DE CAMPO CON FALLA TRANSITORIA 2, CUANDO EL MOTOR OPERA AL 75% DE LA CARGA

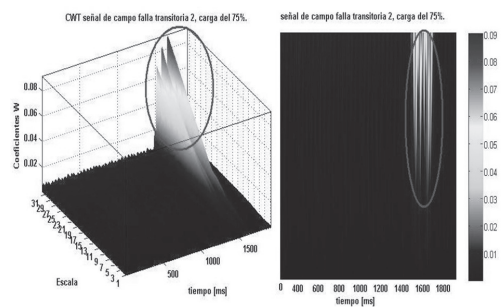
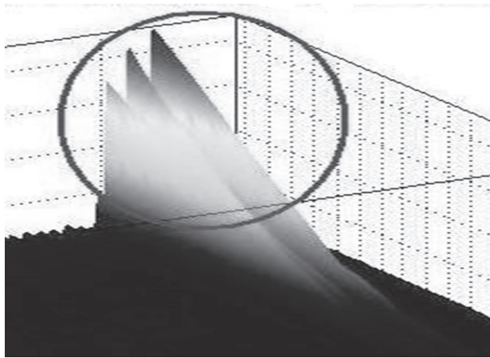


FIG. 14. ACERCAMIENTO DE LA FIG. 13



#### D. Flujo Magnético de Dispersión en los motores de Inducción

La señal de flujo se ha tomado para cuando el motor opera al 100% de su capacidad; dos fallas transitorias de diferente duración se han efectuado, cuyos resultados en el dominio Wavelet se presentan en las Figuras 15 y 16.

FIG. 15. CWT DE LA SEÑAL DE CAMPO CON FALLA TRANSITORIA 1, CUANDO EL MOTOR OPERA AL 100% DE LA CARGA

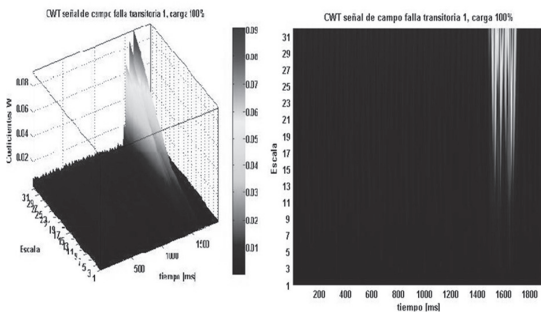
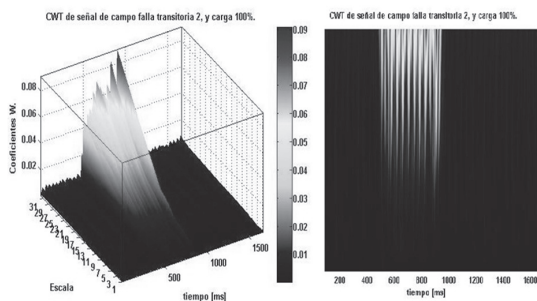


FIG. 16. CWT DE LA SEÑAL DE CAMPO CON FALLA TRANSITORIA 2, CUANDO EL MOTOR OPERA AL 100% DE LA CARGA



### VI. CONCLUSIONES

Los ensayos realizados han demostrado que:

- El flujo de dispersión magnético contiene información sobre el estado funcional del motor de inducción.

- Las pérdidas de aislamiento en estados iniciales generan perturbaciones electromagnéticas transitorias, que modifican las señales de flujo de dispersión. Éste es un indicador que permite evidenciar alteraciones en el comportamiento normal de la máquina.
- La transformada Wavelet ha demostrado su capacidad para identificar y caracterizar eventos electromagnéticos de corta duración, presentes en la señal de flujo de dispersión magnético.
- El análisis en el dominio Wavelet es una herramienta válida, que debe ser incluida dentro de las estrategias de mantenimiento predictivo.

### REFERENCIAS

- [1] P. J. Tavner and J. Penman, Condition Monitoring Of Electrical Machines. Letchworth, U. K: Research Studies Press, 1987.
- [2] J. L. Kohler, J. Sottile, and F. C. Trutt, "Condition-based maintenance of electric machines," in Proc. IEEE Ind. Applicat. Conf, 1999, pp. 205-211.
- [3] Bonnett. A. H, Soukup, G.C. Analysis of rotor failures in squirrel cage induction motors. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 24-6, p.1124-1130. Nov-Dic 1998
- [4] Hachemi B. M, A review of Induction Motor Signature Analysis as a Medium for Faults Detection. IEEE Transactions on Industry Electronics, Vol 47-5 p.984-993. Oct 2000
- [5] Motor Reliability Working Group, "Report of large motor reliability. survey of industrial and comercial installations Part I, and II," IEEE. Trans. Ind. Appl., vol. 21-4, p. 853-872, July-Aug. 1985
- [6] Veruchhi. C. J, Acosta. G.G, "Técnicas de detección y diagnóstico de fallos en Máquinas eléctricas de inducción". IEEE Latin America Transaction Volumen 5 No 1. 2007, p.41-49.
- [7] S. Nandi, H. A. Toliyat, X. Li, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors-A Review," IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 20, no. 4, pp 719 - 729, December 2005.
- [8] J. H. Jung, J. J. Lee, and B. H. Kwon, "Online diagnosis of induction motors using MCSA," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 6, pp. 1842-1852, Dec. 2006.

- [9] Jaideva C.Goswami and Andrew K.Chan, "Fundamentals of Wavelets: Theory, Algorithms, and Applications, John Wiley & Sons", 1999
- [10] J. A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, J. R. Folch, and M. P. M. Palomares, "Validation of a new method for the diagnosis of rotor bar failures via wavelet transform in industrial induction machines," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 42, no. 4, pp. 990-996, Jul./Aug. 2006.
- [11] J. Cusido, L. Romeral, J. A. Ortega, J. A. Rosero, and A. García, "Fault detection in induction machines using power spectral density in wavelet decomposition," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 2, p. 633-643, Feb. 2008
- [12] P.Addison, "The illustrated wavelet transform handbook, Institute of Physics Publishing", 2002.
- [13] Jaideva C.Goswami and Andrew K.Chan, "Fundamentals of Wavelets: Theory, Algorithms, and Applications, John Wiley & Sons", 1999.
- [14] Cortés J.A, Cano H.B, Chaves J.A. "Del Análisis de Fourier a las Wavelets- Transformada Continua Wavelet (CWT). Scientia Et Technica. Vol XIII. No 037.p.p 133-138. Diciembre 2007.