

Algoritmo robusto para el diagnóstico de fallas eléctricas en el motor de inducción trifásico basado en herramientas espectrales y ondeletas.

Francisco Javier Villalobos-Piña^{a,*}, Ricardo Alvarez-Salas^b

^a*Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Aguascalientes Ags. 20240, México teléfono: (+52)-449-9105002 Ext. 183,184 y 106*

^b*Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, SLP. 78290, México teléfono: (+52)-444-8173381*

Resumen

En este trabajo se presenta un conjunto de herramientas basadas en la transformada rápida de Fourier (TRF) y la transformada discreta ondeleta (TDO) Haar, Daubechies y Coiflet utilizando el módulo del vector espacial instantáneo (VEI) de las corrientes de estator del motor de inducción trifásico para diagnosticar fallas en el estator y en el rotor. Se efectúa un estudio en simulación y una validación experimental de fallas eléctricas del estator para cortocircuito entre espiras de un mismo devanado y problemas de fisura de barra y anillo de cortocircuito de rotor. El objetivo del trabajo es contar con una herramienta de tipo no invasiva que permita efectuar el diagnóstico de fallas incipientes (con un carácter preventivo) con el fin de evitar pérdidas económicas importantes en diferentes procesos industriales que utilizan máquinas de inducción aprovechando para ello las virtudes que ofrece la TRF y la TDO mediante el análisis de las firmas de corriente del estator del motor de inducción (MI), así como el diagnóstico de fallas drásticas con fines correctivos. *Copyright © 2015 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.*

Palabras Clave:

Diagnóstico de fallas, motores de inducción, vector espacial instantáneo, transformada rápida de Fourier, ondeletas.

1. Introducción

Las máquinas eléctricas rotatorias representan la principal fuente de movimiento en el sector industrial y han sido aplicadas en casi cualquier lugar de nuestro quehacer diario como sistemas de manufactura, transporte terrestre, aéreo y marítimo, sistemas de aire acondicionado, sistemas de conversión de energía domésticos, sistemas automotrices e incluso sistemas de vibración para teléfonos celulares (Krause et al. (2002)). El motor de inducción (MI) trifásico es ampliamente reconocido como el caballo de batalla del sector industrial. Esta clase de motor ocupa la posición casi exclusiva en la conversión de energía eléctrica a mecánica, siendo responsable de casi el 90 % de la energía consumida por los motores eléctricos. Este tipo de máquina corresponde a cerca del 60 % de todos los motores eléctricos utilizados, la razón principal es su casi nulo mantenimiento (Nandi et al. (2005)). El éxito de los MIs se debe al bajo costo, robustez y alto desempeño en tareas de velocidad variable, este último se ha logrado gracias al desarrollo de nuevas

leyes de control y dispositivos semiconductores más versátiles (Mujica and Espinoza-Pérez (2014)). Sin embargo, la mayoría de los algoritmos de control pueden no ser confiables cuando ocurren fallas (Blanke et al. (2003)), (Puig et al. (2004)), (Triegassou (2011)), (Toliyat et al. (2013)), (Verde et al. (2013)). Las fallas en el circuito de estator del MI trifásico representan un porcentaje significativo de las fallas en el motor (de Angelo et al. (2007)). En esta categoría están las fallas en el devanado del estator tales como cortocircuitos entre espiras y en el circuito magnético. En el primer caso, la asimetría interna causará la circulación de corrientes elevadas en la porción del devanado afectado por la falla, esto contribuye a la degradación de otras porciones del devanado, el tiempo restante entre el inicio de la falla y la falla total depende de diversos factores como son el número inicial de espiras en cortocircuito, la configuración del devanado, la potencia y la tensión alcanzados y las condiciones ambientales entre otros (Cruz and Cardoso (2005)). Desafortunadamente el MI puede fallar debido a otros mecanismos, por ejemplo, falla en la jaula del rotor debido a barras rotas o fisuras en anillos de cortocircuito, las cuales pueden ocurrir debido a la combinación de varios mecanismos de estrés que actúan sobre el rotor (Cruz and Cardoso. (1999)), (Fuente et al. (2007)), (Magallán et al. (2009)). Otra falla es la excentricidad en el entrehierro, si el nivel de ésta se incrementa más allá de cierto

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: f.villalobos@mail.ita.mx (Francisco Javier Villalobos-Piña), r.alvarez@uaslp.mx (Ricardo Alvarez-Salas)

URL: www.ita.mx (Francisco Javier Villalobos-Piña),
<http://ciep.ing.uaslp.mx/electrica/> (Ricardo Alvarez-Salas)

límite puede ocasionar fricción entre el rotor y el estator. También es posible que se presente la falla de rodamientos o baleros que es una de las más comunes (Cardoso and Saravia. (1993)). En investigaciones recientes como (Bonnet and Yung (2008)) se describe la distribución de las fallas del MI y las consecuencias después de que una falla ocurre detallando el proceso de decisión-reemplazo. La distribución de las fallas es la siguiente: fallas de estator (21 %), fallas de rotor (7 %), fallas de balero (69 %) y fallas relacionadas con la flecha, el cople y otras (3 %) (Bellini et al. (2008)).

2. Maqueta de pruebas experimentales

En esta sección se presenta una maqueta de pruebas desarrollada para evaluar los algoritmos de diagnóstico de fallas en el MI.

La maqueta de pruebas se construyó de manera modular y consta de las siguientes partes:

- Un sistema embebido de monitoreo y diagnóstico de fallas en tiempo real basado en el procesador de señales digitales Texas Instrument TMS320F28335 con la instrumentación necesaria para la adquisición de las señales de la máquina a diagnosticar.
- Un conjunto de MIs trifásicos de 3 HP modificados con diferentes tipos de fallas de rotor y estator, estos motores se montan en una base en la cual se les acopla una máquina de corriente directa (CD) a través de la cual es posible aplicar diferentes niveles de par de carga mediante una resistencia de regeneración.
- Una computadora personal ejecutando un programa en lenguaje Delphi que incorpora los algoritmos de diagnóstico del sistema embebido y que permite disponer de un medio redundante de monitoreo y diagnóstico también en tiempo real con amplias posibilidades de graficación.

Un esquema general del sistema desarrollado en el cual se puede apreciar la parte redundante de los algoritmos de diagnóstico de fallas con algunas capacidades de adquisición y tratamiento de señales, control del MI y del troceador para generar el par de carga se muestra en la figura 1.

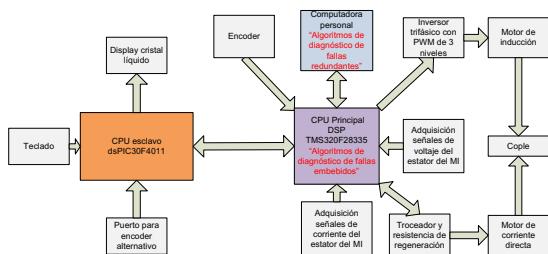


Figura 1: Sistema redundante de hardware y software para el diagnóstico de fallas en el MI.

La maqueta de pruebas experimentales completa se presenta en la figura 2.

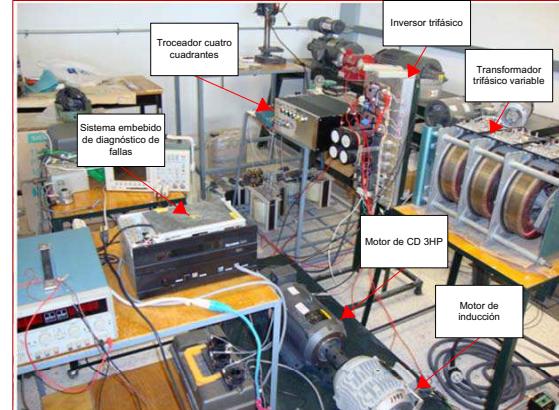


Figura 2: Banco de pruebas experimentales para el diagnóstico de fallas en el MI.

2.1. MIs con fallas

Un grupo de MIs fueron modificados para inducirles a cada uno diferentes tipos de fallas en rotor y estator como se describe a continuación.

2.1.1. Modificación del MI para inducir falla de estator

El MI utilizado se opera a baja tensión (220 V) y tiene una conexión de doble estrella en paralelo. Se realizaron derivaciones del circuito del estator identificando el grupo de bobinas que conforman cada fase. Una vez identificado el grupo de una fase se obtuvieron dichas derivaciones comenzando con 1 vuelta, y después con incrementos de 3 vueltas hasta llegar al total del devanado tal y como se muestra, en el diagrama esquemático de la figura 3.

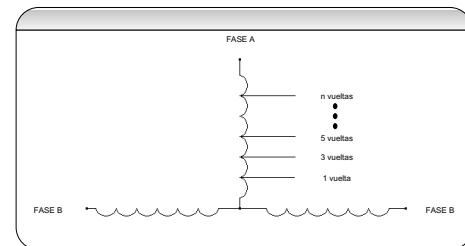


Figura 3: Diagrama esquemático con las derivaciones efectuadas en el circuito del estator del MI.

En la figura 4 se muestra el proceso de modificación del MI para inducirle los diferentes niveles de daño al circuito del estator, además se aprecian las derivaciones que se extrajeron fuera de la máquina para ser cortocircuitadas mediante un arreglo de contactores para la validación experimental de los algoritmos de diagnóstico.

2.1.2. Modificación del MI para inducir falla de rotor

Para el caso de la falla eléctrica de rotor se estudió uno de los más interesantes que es el de falla de ruptura parcial de una barra del rotor. Para tal propósito se modificó un MI, se identificaron las barras del rotor y, posteriormente, se efectuó una

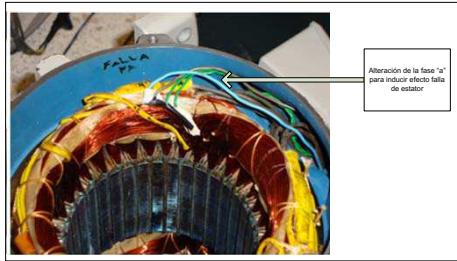


Figura 4: Detalles de la modificación del estator del MI para inducir falla.

perforación de un diámetro de $1/8$ pulgada y profundidad de 15 mm. Cabe señalar que esta perforación no fragmenta completamente la barra ya que tiene un espesor de 25 mm. En la figura 5 se presenta el rotor perforado.

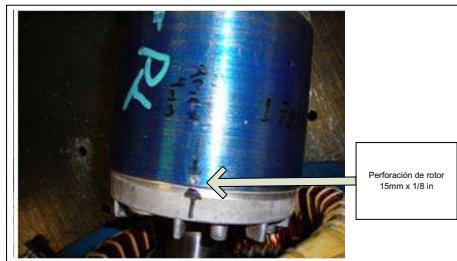


Figura 5: Detalles de la modificación del rotor del MI para inducir falla.

3. Diagnóstico de fallas en el MI

En esta sección se presentan los tipos más comunes de fallas en los MI, así como el vector espacial instantáneo (VEI) o vector de Park, se describen las propiedades que permiten utilizarlo en el diagnóstico de fallas (Milanez and Emanuel (2003)).

3.1. Tipos de fallas en el MI

La mayoría de las fallas del MI pueden ser clasificadas como (Nandi et al. (2005)):

- Fallas de rodamientos o baleros.
- Fallas del estator.
- Fallas debidas a barras rotas y rupturas en anillos de cortocircuito del rotor.
- Fallas relacionadas con la excentricidad.

3.2. Vector espacial instantáneo (VEI)

En un sistema trifásico de cuatro hilos no balanceado, las corrientes de línea en las fases a , b y c y la línea del neutro son

$$\begin{aligned} i_a &= i_a^+ + i_a^- + i_a^0 \\ i_b &= i_b^+ + i_b^- + i_b^0 \\ i_c &= i_c^+ + i_c^- + i_c^0 \\ i_N &= i_N^+ + i_N^- + i_N^0 \end{aligned} \quad (1)$$

donde i_a , i_b , i_c e i_N son las corrientes de las fases a , b , c y neutro con componentes de secuencia positiva, negativa y cero. Las corrientes del fasor de espacio instantáneo medidas en las fases a , b y c se definen como:

$$\tilde{I} = \tilde{I}^+ + \tilde{I}^- + \tilde{I}^0$$

$$\begin{aligned} \tilde{I}^+ &= \frac{2}{3}(i_a^+ + ai_b^+ + a^2i_c^+) = \tilde{I}^+ e^{j(wt+\varphi^+)} \\ \tilde{I}^- &= \frac{2}{3}(i_a^- + ai_b^- + a^2i_c^-) = \tilde{I}^- e^{j(-wt+\varphi^-)} \\ \tilde{I}^0 &= \frac{2}{3}(i_a^0 + ai_b^0 + a^2i_c^0) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Una cantidad importante relacionada con el VEI que ayuda a separar las componentes de secuencia positiva y negativa es el cuadrado de la magnitud del fasor:

$$\begin{aligned} |\tilde{I}|^2 &= |\tilde{I}^+ + \tilde{I}^-|^2 \\ |\tilde{I}^+ + \tilde{I}^-|^2 &= (\tilde{I}^+)^2 + (\tilde{I}^-)^2 + \\ &2(\tilde{I}^+\tilde{I}^-)\cos(2wt + \varphi^+ + \varphi^-) \end{aligned} \quad (3)$$

El valor promedio del cuadrado del VEI es:

$$\langle |\tilde{I}|^2 \rangle = (\tilde{I}^+)^2 + (\tilde{I}^-)^2 \quad (4)$$

De la expresión anterior se encuentra que $|\tilde{I}|^2$ tiene una característica distintiva, este valor oscila entre un máximo

$$|\tilde{I}|_M^2 = (\tilde{I}^+ + \tilde{I}^-)^2 \quad (5)$$

y un mínimo

$$|\tilde{I}|_m^2 = (\tilde{I}^+ - \tilde{I}^-)^2 \quad (6)$$

resolviendo las ecuaciones anteriores, las componentes de secuencia positiva y negativa son

$$\begin{aligned} \hat{I}^+ &= (|\tilde{I}|_M + |\tilde{I}|_m)/2 \\ \hat{I}^- &= (|\tilde{I}|_M - |\tilde{I}|_m)/2 \end{aligned} \quad (7)$$

Esto significa que los valores extremos del VEI ayudan a extraer las componentes de secuencia positiva y negativa. Lo mismo aplica para las señales de tensión. Por lo que el monitoreo de \hat{I}^+ ; \hat{I}^- ; \hat{V}^+ y \hat{V}^- permite la estimación del desbalance de corrientes y tensiones, por ejemplo:

$$\%IU = 100 \frac{\hat{I}^-}{\hat{I}^+} = 100 \frac{|\tilde{I}_M| - |\tilde{I}_m|}{|\tilde{I}_M| + |\tilde{I}_m|} \quad (8)$$

Usando el VEI es posible detectar y aislar fallas simultáneas eléctricas (de rotor y estator) y mecánicas (de rodamientos o balero y excentricidad estática).

4. Análisis frecuencial

En esta sección se describen las herramientas utilizadas, así como la caracterización de los espectros de firma de falla utilizando el módulo del VEI para las diferentes fallas eléctricas de estator y rotor.

4.1. Análisis de la firma de falla de la corriente del estator

La firma de falla resultante del módulo del VEI de las corrientes del estator del MI, como se ilustra en la figura 6, se le aplican básicamente dos técnicas de análisis:

- Transformada rápida de Fourier (TRF) base 2 diezmada en tiempo.
- Transformada discreta ondeleta (TDO).

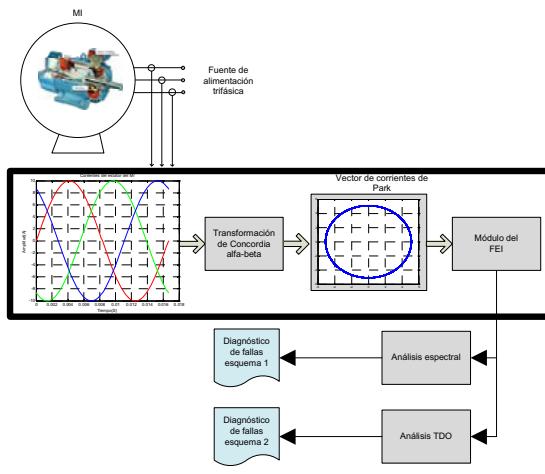


Figura 6: Esquema del diagnóstico de fallas del MI.

4.1.1. Transformación de Concordia

Para visualizar el efecto de desbalance del VEI que provoca una falla en el MI, las corrientes de línea se mapean a un marco de referencia ($\alpha - \beta$) fijo con respecto al estator:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & \cos(-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\frac{2\pi}{3}) \\ 0 & -\sin(-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

Por lo que la magnitud al cuadrado del VEI es ahora:

$$\|i_{\alpha\beta}\|^2 = i_\alpha^2 + i_\beta^2 \quad (10)$$

4.2. Caracterización de los espectros de firma de falla

Para cada uno de los escenarios de falla eléctrica se tiene un espectro de firma de falla del módulo del VEI. Las frecuencias características para cada una de las fallas eléctricas de rotor y estator asociadas a las firmas de falla del módulo del VEI se describen a continuación (Verucchi and Acosta (2007)).

4.2.1. Espectro de firma de falla del estator

Tomando en cuenta el hecho de que la existencia de componentes de corriente de secuencia negativa está directamente relacionada con la asimetría del motor, es clara la manifestación de la presencia de una falla del estator mediante el análisis espectral del VEI (Cruz and Cardoso (2001)).

Para el caso de la falla eléctrica del estator $F_{estator}$, el espectro de firma de falla del VEI ocurre en múltiplos de n del doble de la frecuencia de la línea f_L , en donde $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$, (Drif and Cardoso (2006)):

$$F_{estator} = 2nf_L \quad (11)$$

La magnitud del espectro de firma de falla decrece conforme el múltiplo n se incrementa. Para el caso práctico se analiza el espectro para $n = 1$ ya que es el que presenta la mayor magnitud, entonces se tiene:

$$F_{estator} = 2f_L \quad (12)$$

4.2.2. Espectro de firma de falla del rotor

La falla de rotor F_{rotor} debida a barras rotas o ruptura en el anillo de cortocircuito del rotor tiene una espectro de firma de falla de baja frecuencia que depende del deslizamiento de la máquina s y de la frecuencia ($Razik$ et al. (2009)):

$$F_{rotor} = 2sf_L \quad (13)$$

El deslizamiento s se expresa en función del número de polos P del MI trifásico y de la velocidad del rotor ω_m en radianes por segundo y de la frecuencia de alimentación f_L :

$$s = 1 - \frac{P\omega_m}{2(2\pi f_L)} \quad (14)$$

4.3. Resultados de simulación - análisis espectral

La figura 7 presenta el espectro en frecuencia del módulo del VEI obtenido en simulación para un MI 3 kW cuyas características se dan en la Tabla 1 para el caso sin falla, se observa que la magnitud del espectro de firma de falla en $2f_L$ (120 Hz) y su magnitud permanece constante al incrementar el nivel del par de carga.

En la figura 8 se presenta el caso de simulación para la mitad de un devanado cortocircuitado en el cual el espectro de firma de falla aparece a la misma frecuencia de 120Hz y conforme se incrementa el par de carga aumenta la magnitud del armónico hasta llegar a 3.5A aproximadamente.

En la figura 9 se presenta el caso de simulación con y sin falla incipiente de rotor para el mismo motor con una fisura en el anillo de cortocircuito del rotor. Se aplica un par de carga

Tabla 1: Parámetros del ML.

Parámetro	Simulado	Valor	Unidades
Resistencia de estator fases a,b,c	$R_{sa,rb,sc}$	1.160	Ω
Resistencia de rotor fases a,b,c	$R_{ra,rb,rc}$	1.000	Ω
Inductancia de estator fases a,b,c	$L_{sa,rb,sc}$	0.006	H
Inductancia de rotor fases a,b,c	$L_{ra,rb,rc}$	0.003	H
Inductancia mutua del estator	L_{ms}	0.100	H
Inductancia mutua del rotor	L_{mr}	0.100	H
Inductancia mutua	L_m	0.100	H
Momento de inercia	J	0.025	Kgm
Coeficiente de fricción viscosa	β	0.00445	Nms/rad
Número de polos	P	4	polos

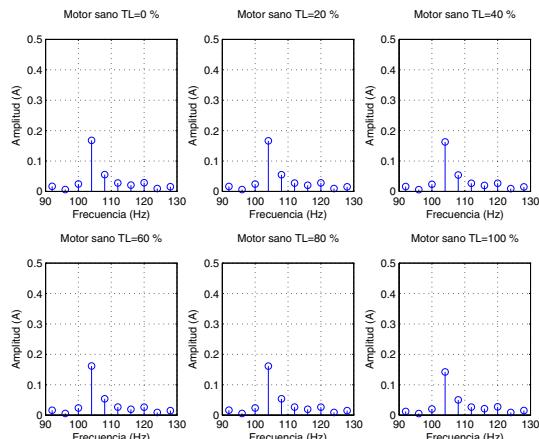


Figura 7: Espectro en frecuencia del módulo del VEI - motor sin falla (simulación).

tal que permite un deslizamiento $s = 0,023438$ lo cual origina una componente armónica a una frecuencia de firma de falla de rotor en $F_{rotor} = 2,8125$ Hz. Se observa un incremento en la magnitud del armónico de $0,5 \times 10^{-3}$ A para el caso sin falla a una magnitud de $4,7 \times 10^{-3}$ A para el caso con la falla de rotor.

4.4. Resultados experimentales - análisis espectral

En la figura 10 se presenta el espectro en frecuencia para el caso experimental sin falla en el cual debe notarse que existe una componente de frecuencia en $2f_L$ (120 Hz) y la amplitud se incrementa proporcionalmente con el nivel de par de carga. Sin embargo, la amplitud máxima es pequeña (0.4A) a un cuando el par de carga aplicado es el nominal.

Ahora se considera el caso cuando la mitad del devanado de una fase se encuentra cortocircuitado. La figura 11 muestra el espectro en frecuencia de la magnitud del VEI obtenido para

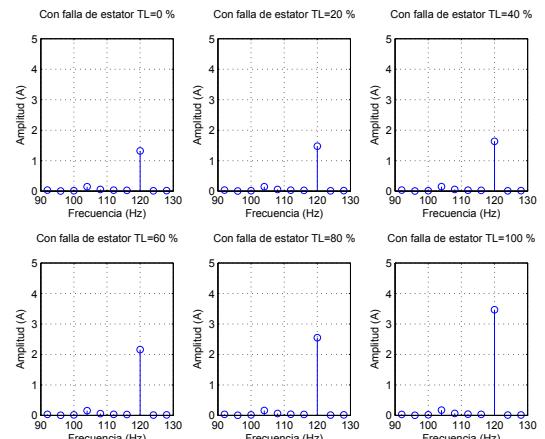


Figura 8: Espectro en frecuencia del módulo del VEI - motor con falla de estator (simulación).

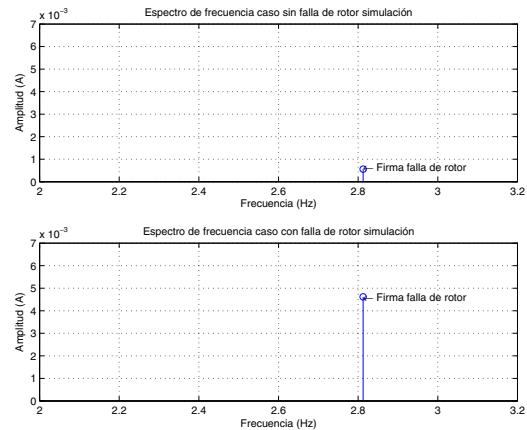


Figura 9: Espectro en frecuencia del módulo del VEI - motor con falla incipiente de rotor (simulación)

el caso experimental. Es importante notar que la componente a $2f_L$ (120Hz) es cerca de diez veces mayor que la obtenida para el caso de un motor sin falla.

El resultado experimental con y sin la falla incipiente de rotor se presenta en la figura 12, se puede apreciar un incremento en la magnitud del espectro de firma de falla de $2,4 \times 10^{-3}$ A para el caso sin falla a una magnitud de $4,3 \times 10^{-3}$ A para el caso con falla.

El análisis espectral presenta el inconveniente de reajustar la frecuencia de muestreo F_s cuando se pretende manejar una cantidad limitada de muestras en el sistema de procesamiento digital para efectuar la captura de la ventana del espectro de firma de falla.

5. Análisis con ondeletas

La transformada discreta ondeleta (TDO) es una herramienta matemática con una estructura poderosa y un enorme gra-

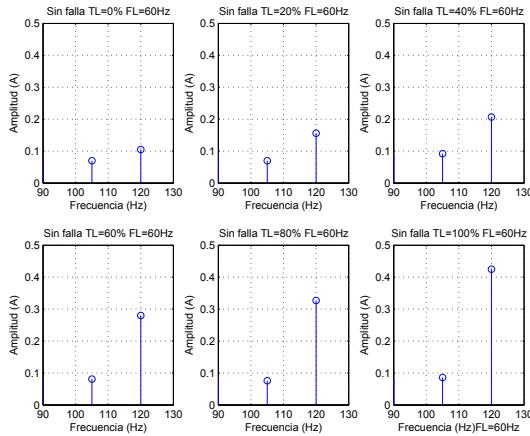


Figura 10: Espectro en frecuencia del módulo del VEI - motor sin falla (experimental).

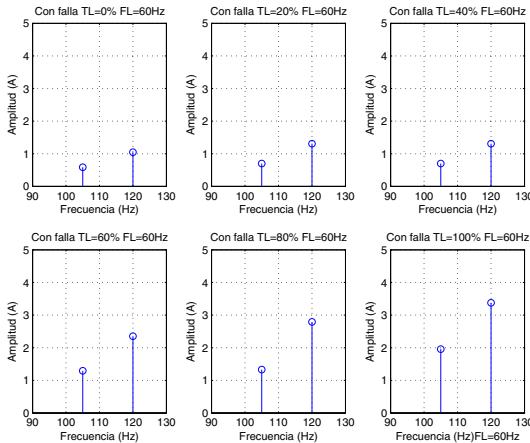


Figura 11: Espectro en frecuencia del módulo del VEI - motor con falla de estator (experimental).

do de libertad para descomponer una firma de falla del módulo del VEI en diferentes escalas a diferentes niveles de resolución (Walker (2008)). En el presente trabajo se hace uso del módulo del VEI para efectuar la descomposición ondeleta como una parte novedosa y redundante al análisis espectral del mismo, cuantificando además en cada banda el nivel de la densidad espectral de potencia como un indicador del nivel de daño presentado. La figura 13 muestra el algoritmo de descomposición multi-resolución usado para la implementación de la TDO.

En esta figura, $x[n]$ es la señal muestreada a una frecuencia F_s Hz del módulo del VEI $x(t)$. La señal digitalizada $x[n]$ se descompone primero en $a_1(n)$ y $d_1(n)$ usando un filtro pasa bajas $l(n)$ y un filtro pasa altas $h(n)$ respectivamente, en donde $d_1(n)$ se llama función de fluctuación, diferencia o detalle el cual contiene los elementos de alta frecuencia y $a_1(n)$ se llama función trama, promedio o aproximación el cual contiene los elementos de baja frecuencia, y recibe el nombre de primer nivel de descomposición. El segundo nivel de descomposición

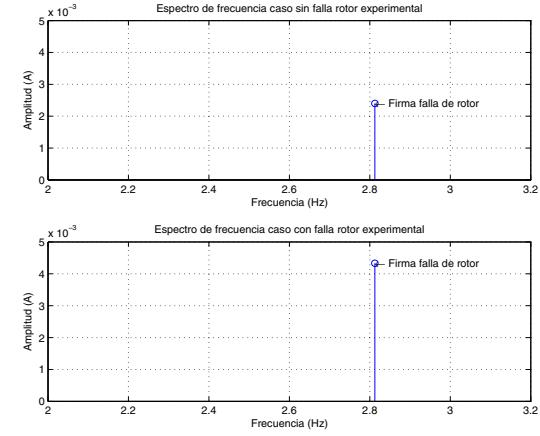


Figura 12: Espectro en frecuencia del módulo del VEI - motor con falla incipiente de rotor (experimental).

se basa ahora en el coeficiente $a_1(n)$ el cual da $a_2(n)$ y $d_2(n)$. El siguiente nivel descomposición mayor se basa ahora en el coeficiente $a_3(n)$ y así sucesivamente. Para cualquier nivel j , el coeficiente de aproximación $a_j(n)$ se descompondrá en frecuencias $0 - f_c$ Hz. De manera similar, el coeficiente $d_j(n)$ a cualquier nivel j contendrá frecuencias en un rango $f_c - 2f_c$ Hz. La frecuencia de corte f_c del coeficiente de aproximación $a_j(n)$ a cualquier nivel j se encuentra mediante

$$f_c = \frac{F_s}{2^{j+1}} \quad (15)$$

La cantidad de componentes en los coeficientes de aproximación y detalle decrecen gradualmente debido a la decimación. Para determinar la TDO todo lo que se necesita son los filtros. La señal de firma de falla (módulo del VEI) se convoluciona con estos filtros. En contraste con la TRF, la resolución en el tiempo llega a ser arbitrariamente fina a altas frecuencias, mientras que la resolución en frecuencia llega a ser fina a bajas frecuencias.

El diagnóstico de fallas usando el MRA con la TDO se realiza mediante el cálculo del valor RMS (por sus siglas en inglés) 16 de la densidad espectral de los coeficientes de cada nivel de descomposición. Cuando el módulo del VEI de las señales de estator se adquiere para diferentes fallas eléctrica de estator y rotor y se le aplica la TDO obteniéndose diferencias apreciables en los coeficientes de la TDO. Por consiguiente, un nodo de potencia ondeleta C_j a un nivel j de descomposición.

$$C_j = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N_j} w_{j,k}^2} \quad (16)$$

en donde N_j es el número de coeficientes de cada nivel j , $w_{j,k}$ es el k -ésimo coeficiente calculado para el nivel j , C_j es el valor RMS del módulo de la firma de falla VEI descompuesto al nivel j . Este mide la potencia de la señal contenida en una banda específica de frecuencia apuntada por el índice j .

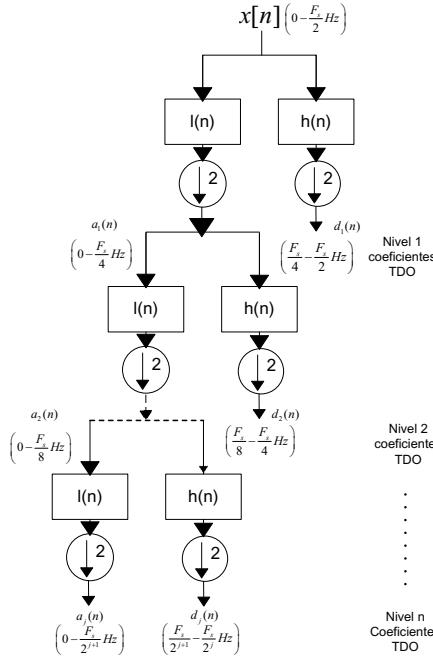


Figura 13: Estructura del MRA con ondeletas.

5.1. Ondeleta de Haar

La ondeleta de Haar es la más simple, en la forma discreta se relaciona con la operación denominada transformación de Haar. La transformada de Haar descompone una señal en dos subseñales de iguales longitudes aproximación a_j y detalle d_j .

Los coeficientes de aproximación para $m = 1, 2, 3, \dots, N/2$ se calculan como:

$$a_m = \frac{f_{2m-1} + f_{2m}}{\sqrt{2}} \quad (17)$$

Los coeficientes de fluctuación para $m = 1, 2, 3, \dots, N/2$ se obtienen como:

$$d_m = \frac{f_{2m-1} - f_{2m}}{\sqrt{2}} \quad (18)$$

La transformada de Haar de nivel 1 se calcula como:

$$f \xrightarrow{H_1} (a^1 | d^1) \quad (19)$$

Este mapeo tiene su inversa

$$f = \left(\frac{a_1 + d_1}{\sqrt{2}}, \frac{a_2 - d_2}{\sqrt{2}}, \dots, \frac{a_{N/2} + d_{N/2}}{\sqrt{2}}, \frac{a_{N/2} - d_{N/2}}{\sqrt{2}} \right) \quad (20)$$

El segundo nivel se obtiene al descomponer los primeros coeficientes de aproximación a_1 y se obtiene un segundo grupo de coeficientes de aproximación a_2 y un segundo grupo de fluctuación d_2 .

$$f \xrightarrow{H_2} (a^2 | d^2 | d^1) \quad (21)$$

Se utiliza la ondeleta de Haar de nivel 1 con múltiples niveles de descomposición en el algoritmo de MRA como se muestra

$$\begin{aligned} WH1_1^1 &= \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}}, 0, 0, \dots, 0 \right) \\ WH1_2^1 &= \left(0, 0, \frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}}, 0, 0, \dots, 0 \right) \\ WH1_2^1 &= \left(0, 0, 0, 0, \frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}}, 0, 0, \dots, 0 \right) \\ &\vdots \\ WH1_{N/2}^1 &= \left(0, 0, \dots, 0, \frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

Las funciones de escala para la ondeleta de Haar nivel 1 con múltiples niveles de descomposición

$$\begin{aligned} VH1_1^1 &= \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, 0, 0, \dots, 0 \right) \\ VH1_2^1 &= \left(0, 0, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, 0, 0, \dots, 0 \right) \\ VH1_2^1 &= \left(0, 0, 0, 0, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, 0, 0, \dots, 0 \right) \\ &\vdots \\ VH1_{N/2}^1 &= \left(0, 0, \dots, 0, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

5.2. Ondeleta Daubechies 4

Existen muchas transformaciones Daubechies aunque todas ellas son similares. La transformada Daubechies 4 (Daub4) se define de manera similar a la transformada de Haar.

Si una señal f tiene un número N de valores par, entonces el nivel uno de la transformada Daub4 es el mapeo:

$$f \xrightarrow{D4_1} (a^1 | d^1) \quad (24)$$

La diferencia en la TDO de Haar y Daubechies consiste en la manera en como las ondeleta y los coeficientes de escala se definen. Los coeficientes ondeleta $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ se definen como:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \\ \beta_2 &= \frac{\sqrt{3}-3}{4\sqrt{2}} \\ \beta_3 &= \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \\ \beta_4 &= \frac{-1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \end{aligned} \quad (25)$$

La ondeleta Daubechies 4 con múltiples niveles de descomposición:

$$\begin{aligned} WD4_1^1 &= (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, 0, 0, \dots, 0) \\ WD4_2^1 &= (0, 0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, 0, 0, \dots, 0) \\ WD4_3^1 &= (0, 0, 0, 0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, 0, 0, \dots, 0) \\ &\vdots \\ WD4_{N/2-1}^1 &= (0, 0, \dots, 0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4) \\ WD4_{N/2}^1 &= (\beta_3, \beta_4, 0, \dots, 0, \beta_1, \beta_2) \end{aligned} \quad (26)$$

Para la TDO Daubechies 4 los coeficientes de escalas son $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ y se definen como:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \\ \alpha_2 &= \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \\ \alpha_3 &= \frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \\ \alpha_4 &= \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}\end{aligned}\quad (27)$$

Haciendo uso de los coeficientes de escala 27 se obtienen las funciones de escala para la TDO Daubechies 4 con múltiples niveles de descomposición:

$$\begin{aligned}VD4_1^1 &= (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, 0, 0, \dots, 0) \\ VD4_2^1 &= (0, 0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, 0, 0, \dots, 0) \\ VD4_3^1 &= (0, 0, 0, 0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, 0, 0, \dots, 0) \\ &\vdots \\ VD4_{N/2-1}^1 &= (0, 0, \dots, 0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) \\ VD4_{N/2}^1 &= (\alpha_3, \alpha_4, 0, 0, \dots, 0, \alpha_1, \alpha_2)\end{aligned}\quad (28)$$

Una propiedad importante de los coeficientes de escala es que todos ellos tienen energía unitaria:

$$\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 + \alpha_4^2 = 1 \quad (29)$$

De igual forma, los coeficientes de la ondeleta tienen energía unitaria:

$$\beta_1^2 + \beta_2^2 + \beta_3^2 + \beta_4^2 = 1 \quad (30)$$

Otra identidad que satisfacen los coeficientes de escala de la ondeleta discreta Daubechies 4:

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = \sqrt{2} \quad (31)$$

Además para los coeficientes ondeleta:

$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 = 0 \quad (32)$$

5.3. Ondeleta Daubechies 6

La diferencia básica entre la ondeleta Daubechies 4 y 6 es el tamaño de los coeficientes ondeleta. Para la Daubechies 6 (Daub6) los coeficientes ondeleta son:

$$\begin{aligned}\beta_1 &= 0,0352262918857095 \\ \beta_2 &= 0,0854412738820267 \\ \beta_3 &= -0,135011020010255 \\ \beta_4 &= -0,459877502118491 \\ \beta_5 &= 0,806891509311092 \\ \beta_6 &= -0,332670552950083\end{aligned}\quad (33)$$

La ondeleta Daubechies 6 con múltiples niveles de descomposición entonces:

$$\begin{aligned}WD6_1^1 &= (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, 0, 0, \dots, 0) \\ WD6_2^1 &= (0, 0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, 0, 0, \dots, 0) \\ WD6_3^1 &= (0, 0, 0, 0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, 0, 0, \dots, 0) \\ &\vdots \\ WD6_{N/2-1}^1 &= (\beta_5, \beta_6, 0, 0, \dots, 0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4) \\ WD6_{N/2}^1 &= (\beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, 0, 0, \dots, 0, \beta_1, \beta_2)\end{aligned}\quad (34)$$

Para la TDO Daubechies 6 los coeficientes de escalas son $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ y se definen como:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= -\beta_6 \\ \alpha_2 &= \beta_5 \\ \alpha_3 &= -\beta_4 \\ \alpha_4 &= \beta_3 \\ \alpha_5 &= -\beta_2 \\ \alpha_6 &= \beta_1\end{aligned}\quad (35)$$

Haciendo uso de los coeficientes de escala 35 se obtienen las funciones de escala para la TDO Daubechies 6 con múltiples niveles de descomposición:

$$\begin{aligned}VD6_1^1 &= (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, 0, 0, \dots, 0) \\ VD6_2^1 &= (0, 0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, 0, 0, \dots, 0) \\ VD6_3^1 &= (0, 0, 0, 0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, 0, 0, \dots, 0) \\ &\vdots \\ VD6_{N/2-1}^1 &= (\alpha_5, \alpha_6, 0, 0, \dots, 0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) \\ VD6_{N/2}^1 &= (\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, 0, 0, \dots, 0, \alpha_1, \alpha_2)\end{aligned}\quad (36)$$

5.4. Ondeleta Coiflet 6

Esta ondeleta fue diseñada para mantener una relación demasiado extrema entre los valores de la aproximación y los valores de la señal original. Los coeficientes de la ondeleta Coiflet 6 (Coif6) se muestran a continuación:

$$\begin{aligned}\beta_1 &= \frac{-3+\sqrt{7}}{16\sqrt{2}} \\ \beta_2 &= -\frac{1-\sqrt{7}}{16\sqrt{2}} \\ \beta_3 &= \frac{14-2\sqrt{7}}{16\sqrt{2}} \\ \beta_4 &= -\frac{14+2\sqrt{7}}{16\sqrt{2}} \\ \beta_5 &= \frac{5+\sqrt{7}}{16\sqrt{2}} \\ \beta_6 &= -\frac{1-\sqrt{7}}{16\sqrt{2}}\end{aligned}\quad (37)$$

La ondeleta Coiflet 6 con múltiples niveles de descomposición entonces:

$$\begin{aligned}WC6_1^1 &= (\beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, 0, 0, \dots, 0, \beta_1, \beta_2) \\ WC6_2^1 &= (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, 0, 0, \dots, 0) \\ WC6_3^1 &= (0, 0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, 0, 0, \dots, 0) \\ &\vdots \\ WC6_{N/2}^1 &= (\beta_5, \beta_6, 0, 0, \dots, 0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4)\end{aligned}\quad (38)$$

Para la TDO Coiflet 6 los coeficientes de escalas se definen como:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= -\beta_6 \\ \alpha_2 &= \beta_5 \\ \alpha_3 &= -\beta_4 \\ \alpha_4 &= \beta_3 \\ \alpha_5 &= -\beta_2 \\ \alpha_6 &= \beta_1\end{aligned}\quad (39)$$

Haciendo uso de los coeficientes de escala 39 se obtienen las funciones de escala para la ondeleta discreta Coiflet 6 con múltiples niveles de descomposición:

$$\begin{aligned}
 VC6_1^1 &= (\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, 0, 0, \dots, 0, \alpha_1, \alpha_2) \\
 VC6_2^1 &= (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, 0, 0, \dots, 0) \\
 VC6_3^1 &= (0, 0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, 0, 0, \dots, 0) \\
 &\vdots \\
 VC6_{N/2}^1 &= (\alpha_5, \alpha_6, 0, 0, \dots, 0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)
 \end{aligned} \quad (40)$$

5.5. Resultados experimentales TDO

Las fallas eléctricas de estator y rotor fueron validadas a nivel experimental usando el MRA mediante la aplicación de cuatro algoritmos de la TDO: Haar nivel 1, Daubechies 4, Daubechies 6 y Coiflet 6. Es importante notar que los cuatro algoritmos proporcionan información valiosa logrando un cambio importante en la densidad espectral de potencia de la banda asociada a la firma de falla de estator y rotor, esto debido al tamaño de la convolución que permite incrementar o reducir la sensibilidad de acuerdo al tipo de ondeleta seleccionada; dicha comparativa se puede verificar en los resultados mostrados. Además se incorpora un análisis estadístico de la varianza para cada una de las bandas obtenidas del MRA.

5.5.1. Resultados experimentales - ondeleta Haar

Se utilizó una frecuencia de muestreo de 1920 Hz para la búsqueda de la falla de estator, en la tabla 2 se presentan los resultados experimentales obtenidos. Para el caso de la falla eléctrica del estator se aprecia un incremento significativo en el valor RMS de la banda de frecuencia de 102,4 – 204,8 Hz de una magnitud de 1,09 para el caso sin falla a un valor de 2,95 unidades para el caso con falla. Además de un cambio de 1,19 a 8,75 unidades de la varianza.

Tabla 2: Resultados experimentales diagnóstico falla de estator - ondeleta Haar.

Nivel	Banda	Motor sano	Falla estator
1	204.8-409.6	14.01-1.05	14.72-7.01
2	102.4-204.8	1.09-1.19	2.95-8.75
3	51.2-102.4	1.24-1.55	3.10-9.61
4	25.6-51.2	0.62-0.39	0.85-0.72
5	12.8-25.6	0.41-0.16	1.30-1.70
6	6.4-12.8	0.43-0.18	0.88-0.78
7	3.2-6.4	0.46-0.03	0.77-0.59
8	1.6-3.2	0.39-0.15	0.44-0.19
9	0.8-1.6	0.30-0.08	0.71-0.05
10	0.4-0.8	0.25-0.001	0.14-0.001
11	0.2-0.4	0.16-0	0.15-0

Se empleó una frecuencia de muestreo de 819,2 Hz para la búsqueda de la falla de rotor, en la tabla 3 se presentan los resultados experimentales obtenidos. Para el caso de la falla de rotor la banda de frecuencia de 1,6 – 3,2 Hz se incrementa también de una magnitud de 0,23 para el caso de motor sano a un valor de 0,47 unidades para el caso con falla de fisura en el anillo de cortocircuito del rotor. Además de un cambio de 0,04 a 0,22 unidades de la varianza.

Tabla 3: Resultados experimentales diagnóstico falla de rotor - ondeleta Haar.

Nivel	Banda	Motor sano	Falla rotor
1	204.8-409.6	6.18-0.16	5.49-1.05
2	102.4-204.8	0.27-0.07	0.65-0.42
3	51.2-102.4	0.53-0.29	1.44-2.08
4	25.6-51.2	0.58-0.34	1.52-2.31
5	12.8-25.6	0.30-0.09	0.51-0.26
6	6.4-12.8	0.36-0.13	0.64-0.41
7	3.2-6.4	0.36-0.13	0.51-0.26
8	1.6-3.2	0.23-0.04	0.47-0.22
9	0.8-1.6	0.16-0.01	0.15-0.01
10	0.4-0.8	0.18-0.001	0.85-0.56
11	0.2-0.4	0.32-0	0.22-0

5.5.2. Resultados experimentales - ondeleta Daubechies 4

Se muestreó a una frecuencia de 1920 Hz para la búsqueda de la falla de estator, en la tabla 4 se presentan los resultados experimentales obtenidos. Para el caso de la falla eléctrica del estator se aprecia un incremento significativo en el valor RMS de la banda de frecuencia de 102,4 – 204,8 Hz de una magnitud de 4,41 para el caso sin falla a un valor de 4,84 unidades para el caso con falla. Además de un cambio de 16,38 a 20,44 unidades de la varianza.

Tabla 4: Resultados experimentales diagnóstico falla de estator - ondeleta Daubechies 4.

Nivel	Banda	Motor sano	Falla estator
1	204.8-409.6	6.23-28.56	5.39-18.71
2	102.4-204.8	4.41-16.38	4.84-20.44
3	51.2-102.4	2.82-7.09	3.26-9.75
4	25.6-51.2	1.46-2.01	1.96-3.72
5	12.8-25.6	0.90-0.77	1.34-1.81
6	6.4-12.8	0.51-0.26	1.06-1.13
7	3.2-6.4	0.36-0.12	0.86-0.74
8	1.6-3.2	0.64-0.42	0.87-0.76
9	0.8-1.6	1.30-1.69	3.10-9.61
10	0.4-0.8	1.10-1.12	3.24-10.53
11	0.2-0.4	0.79-0.63	1.11-1.24

Se utilizó una frecuencia de muestreo de 819,2 Hz para la búsqueda de la falla de rotor, en la tabla 5 se presentan los resultados experimentales obtenidos. Para el caso de la falla de rotor la banda de frecuencia de 1,6 – 3,2 Hz se incrementa también de una magnitud de 0,59 para el caso de motor sano a un valor de 1,54 unidades para el caso con falla de fisura en el anillo de cortocircuito del rotor. Además de un cambio de 0,34 a 2,38 unidades de la varianza.

5.5.3. Resultados experimentales - ondeleta Daubechies 6

Se empleó una frecuencia de muestreo de 1920 Hz para la búsqueda de la falla de estator, en la tabla 6 se presentan los resultados experimentales obtenidos. Para el caso de la falla eléctrica del estator se aprecia un incremento significativo en el valor RMS de la banda de frecuencia de 102,4 – 204,8 Hz de una magnitud de 3,09 para el caso sin falla a un valor de 7,87

Tabla 5: Resultados experimentales diagnóstico falla de rotor - ondeleta Daubechies 4.

Nivel	Banda	Motor sano	Falla rotor
1	204.8-409.6	1.45-1.97	4.04-12.53
2	102.4-204.8	0.78-0.56	3.32-9.16
3	51.2-102.4	0.48-0.22	1.62-2.38
4	25.6-51.2	0.31-0.08	0.86-0.71
5	12.8-25.6	0.32-0.10	0.76-0.58
6	6.4-12.8	0.34-0.11	0.38-0.14
7	3.2-6.4	0.28-0.08	0.41-0.17
8	1.6-3.2	0.59-0.34	1.54-2.38
9	0.8-1.6	0.60-0.36	1.62-2.63
10	0.4-0.8	0.24-0.05	0.49-0.24
11	0.2-0.4	0.16-0.02	0.17-0.03

unidades para el caso con falla. Además de un cambio de 9,58 a 62,05 unidades de la varianza.

Tabla 6: Resultados experimentales diagnóstico falla de estator - ondeleta Daubechies 6.

Nivel	Banda	Motor sano	Falla estator
1	204.8-409.6	2.49-5.95	6.93-46.23
2	102.4-204.8	3.09-9.58	7.87-62.05
3	51.2-102.4	1.99-3.99	4.75-22.59
4	25.6-51.2	1.09-1.20	2.90-8.43
5	12.8-25.6	0.69-0.48	1.82-3.30
6	6.4-12.8	0.41-0.17	1.00-1.01
7	3.2-6.4	0.34-0.11	0.75-0.57
8	1.6-3.2	0.59-0.35	0.66-0.43
9	0.8-1.6	1.35-1.82	3.00-9.01
10	0.4-0.8	1.08-1.17	3.41-11.68
11	0.2-0.4	0.79-0.62	0.93-0.87

Se muestreó a una frecuencia de 819,2 Hz para la búsqueda de la falla de rotor, en la tabla 7 se presentan los resultados experimentales obtenidos. Para el caso de la falla de rotor la banda de frecuencia de 1,6 – 3,2 Hz se incrementa también de una magnitud de 1,58 para el caso de motor sano a un valor de 1,48 unidades para el caso con falla de fisura en el anillo de cortocircuito del rotor. Además de un cambio de 0,33 a 2,21 unidades de la varianza.

5.5.4. Resultados experimentales - ondeleta Coiflet 6

Se utilizó una frecuencia de muestreo de 1920 Hz para la búsqueda de la falla de estator, en la tabla 8 se presentan los resultados experimentales obtenidos. Para el caso de la falla eléctrica del estator se aprecia un incremento significativo en el valor RMS de la banda de frecuencia de 102,4 – 204,8 Hz de una magnitud de 4,20 para el caso sin falla a un valor de 8,94 unidades para el caso con falla. Además de un cambio de 17,72 a 79,97 unidades de la varianza.

Se utilizó una frecuencia de muestreo de 819,2 Hz para la búsqueda de la falla de rotor, en la tabla 9 se presentan los resultados experimentales obtenidos. Para el caso de la falla de rotor la banda de frecuencia de 1,6 – 3,2 Hz se incrementa también

Tabla 7: Resultados experimentales diagnóstico falla de rotor - ondeleta Daubechies 4.

Nivel	Banda	Motor sano	Falla rotor
1	204.8-409.6	1.36-1.85	3.29-10.45
2	102.4-204.8	0.75-0.56	3.37-11.36
3	51.2-102.4	0.47-0.22	1.90-3.63
4	25.6-51.2	0.27-0.07	1.16-1.34
5	12.8-25.6	0.33-0.10	0.72-0.51
6	6.4-12.8	0.34-0.11	0.45-0.20
7	3.2-6.4	0.28-0.07	0.36-0.13
8	1.6-3.2	0.58-0.33	1.48-2.21
9	0.8-1.6	0.62-0.38	1.72-2.96
10	0.4-0.8	0.22-0.05	0.37-0.14
11	0.2-0.4	0.15-0.02	0.15-0.02

Tabla 8: Resultados experimentales diagnóstico falla de estator - ondeleta Coiflet 6.

Nivel	Banda	Motor sano	Falla estator
1	204.8-409.6	4.74-22.45	9.07-82.38
2	102.4-204.8	4.20-17.72	8.94-79.97
3	51.2-102.4	2.68-7.21	5.57-31.03
4	25.6-51.2	1.50-2.25	3.24-10.55
5	12.8-25.6	0.86-0.73	1.95-3.82
6	6.4-12.8	0.49-0.24	1.08-1.16
7	3.2-6.4	0.40-0.16	1.03-1.07
8	1.6-3.2	0.65-0.43	0.86-0.74
9	0.8-1.6	1.30-1.70	3.07-9.42
10	0.4-0.8	1.08-1.17	3.26-10.66
11	0.2-0.4	0.79-0.63	1.09-1.20

de una magnitud de 0,59 para el caso de motor sano a un valor de 1,53 unidades para el caso con falla de fisura en el anillo de cortocircuito del rotor. Además de un cambio de 0,33 a 2,21 unidades de la varianza.

5.5.5. Análisis estadístico de resultados experimentales

Se efectuó un análisis estadístico mediante el uso de pruebas de hipótesis con función de densidad de probabilidad normal para cada una de las bandas de interés para las fallas eléctricas de estator 14 y rotor 15 como se ilustra en las figuras para los cuatro escenarios de análisis con las ondeletas de Haar, Daubechies 4, Daubechies 6 y Coiflet 6, en el cual se estudió el porcentaje de probabilidad de rechazar de manera errónea la hipótesis del promedio la densidad espectral de potencia estimada para cada una de las bandas de interés y cuyos resultados se resumen en la tabla 10.

5.5.6. Análisis de robustez del algoritmo

Para evaluar la robustez del algoritmo se puso en operación el MI durante un período prolongado para lograr un calentamiento de la máquina y, como consecuencia, la variación significativa de parámetros debida a los cambios de temperatura con la finalidad de verificar la variación experimental de los umbrales de firma de falla y poder así validar la robustez del algoritmo ante dichas variaciones. Se encontró una variación

Tabla 9: Resultados experimentales diagnóstico falla de rotor - ondeleta Coiflet 6.

Nivel	Banda	Motor sano	Falla rotor
1	204.8-409.6	1.93-3.74	4.04-16.35
2	102.4-204.8	1.07-1.16	3.32-11.03
3	51.2-102.4	0.62-0.38	1.98-3.95
4	25.6-51.2	0.36-0.12	1.15-1.31
5	12.8-25.6	0.36-0.12	0.67-0.46
6	6.4-12.8	0.32-0.10	0.56-0.31
7	3.2-6.4	0.29-0.08	0.37-0.14
8	1.6-3.2	0.59-0.34	1.53-2.35
9	0.8-1.6	0.60-0.37	1.63-2.65
10	0.4-0.8	0.22-0.05	0.47-0.22
11	0.2-0.4	0.16-0.02	0.17-0.03

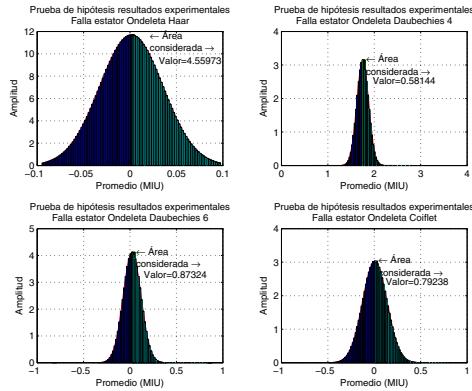


Figura 14: Prueba de hipótesis para una distribución normal falla estator.

máxima de un 5 % debida al cambio en el valor de las resistencias de la máquina, en la tabla 11 y 12 se presenta el resumen de las variaciones de los umbrales de firma de falla para las fallas de estator y rotor, respectivamente. Se aprecia un cambio que permite tener un rango de variación suficiente para lograr un algoritmo robusto a dichas variaciones.

6. Conclusiones

En el presente trabajo se presentaron dos algoritmos para realizar el diagnóstico de fallas eléctricas de estator y rotor utilizando técnicas basadas en el análisis de espectro de frecuencia del módulo del VEI de las corrientes de estator del MI usando la TRF base dos diezmada en tiempo, la cual presenta el inconveniente que para la búsqueda de las firmas de falla en función de la velocidad del motor se tiene que reajustar la frecuencia de muestreo cuando se utiliza un esquema de pocas muestras en el sistema electrónico implementado.

El MRA con la TDO permite trabajar a una determinada frecuencia de muestreo y tomando una cantidad adecuada de muestras es posible estudiar las diferentes bandas de frecuencia que contienen los espectros de firma de falla de estator y rotor sin necesidad de efectuar ajustes en la misma.

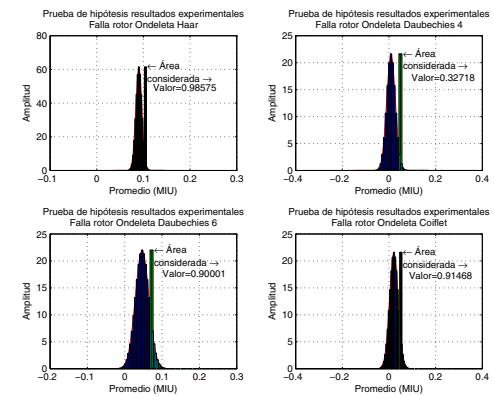


Figura 15: Prueba de hipótesis para una distribución normal falla rotor.

Tabla 10: Resultados prueba de hipótesis fallas estator y rotor.

Falla	Haar	Daub. 4	Daub. 6	Coiflet 6
Estator	455.9 %	58.1 %	87.3 %	79.2 %
Rotor	98.5 %	32.7 %	90 %	91.4 %

Se efectuó un análisis comparativo experimental entre cuatro ondeletas madre, Haar nivel 1, Daubechies 4, Daubechies 6 y Coiflet 6, mostrando todas ellas la capacidad de detectar el cambio en la densidad espectral de potencia asociada a la banda de frecuencia que contiene el espectro de firma de falla eléctrica de estator o rotor, efectuando además, un análisis comparativo con los resultados de simulación y experimentales obtenidos por la técnica de análisis espectral del módulo del VEI.

Se demuestra la capacidad de la TDO para detectar fallas eléctricas en escenarios como es el caso drástico de falla de estator con la mitad de una fase cortocircuitada y escenarios con falla incipiente como el caso de fisura de anillo de cortocircuito de rotor.

Es posible establecer un valor umbral tanto en la densidad espectral de potencia de la banda ondeleta como en la amplitud del armónico de firma de falla lo cual garantiza una robustez del algoritmo en cuanto a la sensibilidad en la detección de los diferentes escenarios de falla eléctrica.

El contar con ambas herramientas de análisis permite una mayor seguridad en el juicio del estado del MI ya que se cuenta con dictámenes redundantes.

English Summary

Robust algorithm for electric fault diagnosis in the three phase induction machine based on spectral and wavelet tools.

Abstract

This work present a group of tools based on the fast Fourier transform (FFT) and Haar, Daubechies and Coiflet discrete wavelet transform (DWT), using the Park's instantaneous space phasor module (ISP) of the three phase induction machine stator currents for electric stator and rotor fault diagnosis. A si-

Tabla 11: Análisis de robustez del algoritmo para la falla de estator

Ondeleta	Banda Hz	Motor sano	Falla estator
Haar	102.4-204.8	1.14	3.09
Daub. 4	102.4-204.8	4.63	5.06
Daub. 6	102.4-204.8	3.24	8.26
Coiflet 6	102.4-204.8	4.41	9.38

Tabla 12: Análisis de robustez del algoritmo para la falla de rotor

Ondeleta	Banda Hz	Motor sano	Falla estator
Haar	1.6-3.2	0.24	0.49
Daub. 4	1.6-3.2	0.61	1.61
Daub. 6	1.6-3.2	0.60	1.55
Coiflet 6	1.6-3.2	0.61	1.60

mulation and experimental validation for inter-turn stator short-circuit electric fault and end-ring broken rotor fault diagnosis was performed. The main objective of the work is to perform a non invasive electric fault diagnosis to avoid economical losses in the industrial process using the advantages of spectral and wavelet tools.

Keywords:

Fault diagnosis, induction machines, instantaneous space phasor, fast Fourier transform, wavelets.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería del Instituto Tecnológico de Aguascalientes, el apoyo del proyecto PROMEP/ITA/103.5/13/8890 y con recursos del convenio PROMEP/UASLP/CARepPreI-15 y C14-FAI-04-42.42.

Referencias

- Bellini, A., Filippetti, F., Tassoni, C., Capolino, A. G., December 2008. Advances in diagnostic techniques for induction machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 55 (12), 4109–4126.
- Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J., Staroswiecki, M., 2003. Diagnosis and Fault-Tolerant Control, Second Edition. Springer Verlag, Alemania.
- Bonnet, A. H., Yung, C., January–February 2008. Increased efficiency versus increased reliability. *IEEE Transactions on Industrial Applications* 14 (1), 29–36.
- Cardoso, A. J. M., Saravia., E. S., September 1993. Computer-aided detection of airgap eccentricity in operating three-phase induction motors by Park's vector approach. *IEEE Transactions on Industry Applications* Vol. 29, 897–901.
- Cruz, S., Cardoso, A. J. M., 2005. Multiple reference frames theory: A new method for the diagnosis of stator faults in three-phase induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 20, 289–299.
- Cruz, S. M. A., Cardoso, A. J. M., 1999. Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach. *Industry Applications Conference* Vol. 3, 1929–1934.
- Cruz, S. M. A., Cardoso, A. J. M., September 2001. Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended Park's vector approach. *IEEE Transactions on Industry Applications* 37 (5), 1227–1233.
- de Angelo, C. H., Bossio, G. R., Giaccone, S. J., Solsona, J. A., Valla, M. I., García, G. O., Julio 2007. Una estrategia basada en modelos para el diagnóstico de fallas en el estator del motor de inducción. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 4 (3), 107–115.
- Drif, M., Cardoso, A. J. M., November 2006. Airgap eccentricity fault diagnosis, in three-phase induction motors, by complex apparent power singature analysis. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion SPEEDAM*, S35–18 S35–22.
- Fuente, M. J., Moya, E., Palmero, G. I. S., Abril 2007. Esquema de detección de fallos difuso basado en modelado lingüístico-preciso de un motor de inducción. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 4 (2), 72–80.
- Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D., 2002. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, Second Edition. IEEE Press and Wiley Interscience, EE. UU.
- Magallán, G. A., de Angelo, C. H., García, G. O., Abril 2009. Eliminación de interferencia armónica para la detección de fallas en motores eléctricos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 6 (2), 89–97.
- Milanez, D. L., Emanuel, A. E., February 2003. The instantaneous-space-phasor a powerful diagnosis tool. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 52 (1), 143–148.
- Mujica, H., Espinoza-Pérez, G., 2014. Control no lineal basado en pasividad de motores de inducción para alto desempeño dinámico. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 11, 32–43.
- Nandi, S., Toliyat, H. A., Li, X., December 2005. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors a review. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 20 (4), 719–729.
- Puig, V., Quevedo, J., Escobet, T., Morcego, B., Ocampo, C., Abril 2004. Control tolerante a fallos (parte i): fundamentos y diagnóstico de fallos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 1 (1), 15–31.
- Razik, H., de Rossiter Correa, M. B., de Silva, E. R. C., November 2009. A novel monitoring of load level and broken bar fault severity applied to squirrel-cage induction motors using a genetic algorithm. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 55 (12), 4615–4626.
- Toliyat, H., Nandi, S., Choi, S., Meshing-Kelk, H., 2013. Electrical Machines, 1st Edition. CRC Press. USA.
- Trigeassou, J., 2011. Electrical Machines Diagnosis, 1st Edition. Wiley USA.
- Verde, C., Gentil, S., Morales-Méndez, R., 2013. Monitoreo y diagnóstico automático de fallas en sistemas dinámicos, 1st Edition. Trillas México.
- Verucchi, C. J., Acosta, G. G., March 2007. Técnicas de detección y diagnóstico de fallos en máquinas eléctricas de inducción. *IEEE Latin America* 7 (1), 41–49.
- Walker, J., 2008. A Primer on Wavelets and Their Scientific Applications, 2nd Edition. Chapman & Hall/CRC.