

## Detección de Fallas en un DFIG empleando el Método del Elemento Finito

Raúl A. Ortiz-Medina<sup>\*,\*\*</sup> Francisco J. Villalobos-Piña<sup>\*</sup>  
Ricardo Álvarez-Salas<sup>\*\*\*</sup> Irvin López-García<sup>\*\*\*\*</sup>  
Victor M. Jiménez-Mondragón<sup>\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Ingeniería Eléctrica-Electrónica, Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Aguascalientes, Ags., México (e-mail: raul.ortiz@upa.edu.mx, fvillalobos.ita.mx).

<sup>\*\*</sup> Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Aguascalientes, Aguascalientes Ags., México (e-mail: raul.ortiz@upa.edu.mx)

<sup>\*\*\*</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P., México, (ralvarez@uaslp.mx)

<sup>\*\*\*\*</sup> Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, CDMX, México (e-mail: ilg@correo.azc.uam.mx, vmjm@correo.azc.uam.mx)

---

**Resumen:** Este trabajo aborda la detección de fallas de cortocircuito entre espiras del estator de un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG, por sus siglas en inglés) utilizado para aplicaciones de aerogeneración. El modelo de un DFIG de 3.5 kW se simuló a través del método del elemento finito (MEF) en estado normal y con falla. Se analizaron las corrientes de estator en estado estable dadas por el modelo para el caso sin falla. A continuación el modelo se modificó para reproducir un segundo estado con falla de cortocircuito entre espiras, para el que igualmente se analizaron las corrientes del estator. Para la detección de fallas se utilizaron la Transformada Rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) y Transformada Discreta Wavelet (DWT, por sus siglas en inglés) aplicadas al vector de Park de las corrientes del estator.

*Palabras clave:* Detección de fallas, DFIG, Aerogenerador, MEF, Transformada Wavelet Discreta, Transformada Rápida de Fourier.

---

### 1. INTRODUCCIÓN

El avance en la tecnología de la electrónica de potencia para el control de máquinas eléctricas ha permitido interconectar las turbinas eólicas o aerogeneradores a la red eléctrica. Las topologías empleadas de convertidores de electrónica de potencia son del tipo AC/DC-DC/AC (rectificador -inversor), éstos acondicionan la energía que se entregue al Sistema Eléctrico de Potencia (SEP). Los convertidores de electrónica de potencia se utilizan tanto para máquinas síncronas como de inducción, los cuales permiten que crezca el rango de velocidad de entrada en el que operan las máquinas debido a que la frecuencia de las señales se adapta fácilmente a la frecuencia de la red eléctrica, aumentando así la energía que se captura del viento. A estos generadores se les conoce como turbinas eólicas de velocidad variable (Ngamroo (2017)), (Abad et al. (2011)), (Fried et al. (2017)). Una variante de la configuración de turbinas eólicas de velocidad variable es la que usa un DFIG, que es una máquina de inducción de rotor devanado que se acopla a la red eléctrica mediante un convertidor de potencia de escala parcial, con el estator

conectado directamente a la red a su misma frecuencia y el convertidor se conecta al rotor con la frecuencia dada por el deslizamiento. El convertidor de escala parcial es bidireccional, por un lado alimenta el rotor por medio de anillos deslizantes, mientras que por el otro se conecta directamente al sistema de energía eléctrica. En esta configuración la potencia del convertidor es de aproximadamente 30% de la potencia total del aerogenerador, (Abad et al. (2011)), (Fried et al. (2017)).

Un análisis realizado para determinar la vanguardia tecnológica en máquinas eléctricas para aerogeneradores, se presenta en la tabla 1 donde se muestran las marcas de aerogeneradores que más se instalaron en 2017. Vestas, Siemens-Gamesa y General Electric fueron las turbinas eólicas más instaladas. Estas marcas tienen en común que sus turbinas eólicas principales se basan en el DFIG. Por otro lado, el PMSG de Goldwind en China, Vestas con el IG y el generador anular de Enercon están explotando todas las nuevas tecnologías de convertidores en máquinas de más de 5MW (GWEC (2018)).

El estudio anterior demuestra que el DFIG es una máquina preponderante en los aerogeneradores actuales, por lo que en este trabajo se aborda el problema de detección de fallas en un DFIG para aplicaciones en turbinas eólicas. Para obtener resultados realistas, el DFIG se simuló por el MEF. El DFIG se modeló con base en (Cheng et al. (2013)), donde se simuló a través del MEF con el software FLUX, las características del DFIG para aerogeneración fueron:  $3,5kW$ ,  $220V$ ,  $50Hz$  con fines de diseño (CEDRAT (2009)), (ALTAIR (2016)).

El monitoreo de aerogeneradores y las fallas que éstos presentan se han reportado en diversos trabajos (Pinar et al. (2013)), (Qiao and Lu (2015)), (Shipurkar et al. (2015)) y (Artigao et al. (2018)), que abundan en estadísticas de fallas, tipos de fallas, frecuencia de ocurrencia de las fallas y componentes en los que ocurren las fallas. Se reportan también sistemas de monitoreo, detección y diagnóstico de fallas, que usan sensores de vibración externos en algunos componentes, cuyas señales se tratan con diferentes técnicas de análisis de señales, mientras que otros sistemas usan las propias señales de corriente del aerogenerador con el mismo fin y así determinar los criterios de mantenimiento de acuerdo al resultado de dichos análisis. Existen técnicas generales de detección y diagnóstico de fallas a través del procesamiento de señales, que han sido utilizados para la detección de fallas para diferentes aplicaciones como son motores de inducción de uso industrial y motores brushless DC en aplicaciones industriales y de vehículos eléctricos (Singh et al. (2016)), (Craciunescu et al. (2012)), (Maldonado-Ruelas et al. (2016)) y (Gritli et al. (2017)). Mientras que trabajos específicos sobre fallas eléctricas en aerogeneradores se han reportado en (Sun et al. (2016)), (Ko et al. (2012)), (Shahriar et al. (2018)) y (Peeters et al. (2018)), mostrando que la detección de fallas es parte importante de la investigación actual en aerogeneradores y va de la mano con el crecimiento de la inserción de la energía eólica a la red eléctrica de acuerdo a (GWEC (2018)).

El presente artículo está organizado de la siguiente manera: La sección 2 explica brevemente la teoría del vector de Park o fasor de espacio instantáneo (ISP, por sus siglas en inglés) como herramienta para la detección de desbalances entre las fases de una máquina eléctrica trifásica. Se emplea la FFT para el análisis espectral del comportamiento del módulo del vector de Park durante la falla. La DWT se utiliza para realizar un estudio tiempo-frecuencia de la falla a través del análisis multiresolución. La sección 3 aborda la concepción del modelo del DFIG a través del

MEF. La sección 4 presenta los resultados en simulación con el modelo del DFIG del aerogenerador utilizado en condiciones normales y con falla. En la sección 5 se reportan los resultados obtenidos con el esquema de detección de fallas. Finalmente, en la última sección se dan las conclusiones.

## 2. TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE FALLAS

En esta sección se analizan brevemente las técnicas de detección de fallas de cortocircuito entre-espigas del estator que se aplicaron a un DFIG modelado por el MEF. La detección de fallas se realiza a través del análisis de las señales de corriente del estator, utilizando el vector de Park como herramienta para después analizar las señales con las FFT y DWT.

### 2.1 Vector de Park

El vector de Park, es una herramienta útil para el análisis de máquinas eléctricas en condiciones desbalanceadas (Milanez and Emanuel (2003)). La construcción del vector parte de las corrientes de magnetización que son, en principio, las corrientes de un sistema trifásico balanceado con  $\omega = 2\pi f$ , donde  $f$  es la frecuencia eléctrica. El sistema trifásico, independientemente de la perturbación, cumple con el teorema de Fortescue, que establece que una señal trifásica puede generarse a partir de las componentes de secuencia positiva, negativa y cero (Grainger and Stevenson (1996)). Al determinarse el vector de Park de una señal trifásica a través de sus componentes de secuencia positiva, negativa y cero, se encuentra que éste se puede expresar sólo en términos de sus componentes de secuencia positiva y negativa. A partir de estas componentes es posible obtener el valor promedio y al mismo tiempo su módulo, el cual se muestra en la ecuación (1).

$$|\tilde{I}|^2 = (\hat{I}^+)^2 + (\hat{I}^-)^2 \quad (1)$$

Una forma simple de determinar el efecto que tiene un desbalance en una señal de corriente de una máquina eléctrica es usar el vector de Park de corriente mapeado a un marco de referencia fijo ( $\alpha$ - $\beta$ ) con respecto al estator de la máquina por medio de la transformación de Concordia.

La proyección al marco de referencia  $\alpha$ - $\beta$  es una manera de obtener información de las componentes de secuencia positiva y negativa, por lo cual el módulo del vector de Park de una señal trifásica se puede expresar por medio de la ecuación (2).

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

El módulo del vector de Park permite detectar desbalances, por ende, fallas, ya que cada condición que presenta una máquina eléctrica en sus señales genera diferentes formas de onda en el módulo del vector, por lo que puede emplearse como un indicador o firma de falla para el sistema en cuestión.

Tabla 1. Principales proveedores de turbinas eólicas en 2017.

Marca	Capacidad instalada total	Tipo de máquina
Vestas	94 GW	DFIG, IG
Siemens-Gamesa	84.5 GW	DFIG, PMSG
General Electric	52.5 GW	DFIG, PMSG
Goldwind	52.5 GW	PMSG
Enercon	46.7 GW	AGSPM
Nordex	18 GW	DFIG

## 2.2 Transformada rápida de Fourier

Una herramienta para el análisis de las señales de corriente trifásicas del estator es la FFT, que es un algoritmo para implementar la transformada discreta de Fourier (DFT, por sus siglas en inglés). La DFT es la forma discreta de la transformada de Fourier (FT, por sus siglas en inglés), ésta última es una herramienta de análisis espectral que permite conocer las diferentes componentes en frecuencia que constituyen una señal. La diferencia entre la FT y la DFT es la función de entrada sobre la que se aplica la transformada. En el caso de la FT se necesita una señal periódica en tiempo continuo, que puede tener un número infinito de componentes de frecuencia, donde la separación en frecuencia de dos componentes armónicas sucesivas es  $1/T$  en donde  $T$  es el período de la componente fundamental. Por otra parte, el rango de frecuencias de las señales en tiempo discreto está limitado a los intervalos  $(-\pi, \pi)$  o  $(0, \pi)$ . Una señal discreta de período fundamental  $N$  puede tener componentes de frecuencias separadas  $2\pi/N$  radianes a una frecuencia  $f = 1/N$  (Weeks (2007)).

## 2.3 Transformada Wavelet Discreta

Otra herramienta de análisis de señales es la transformada wavelet que, aplicada a una señal, cambia la forma de ésta con el objetivo de mostrar características que pueden no ser evidentes en la señal original en una primera instancia (Walker (2008)). Para aplicar la transformada wavelet se necesita una wavelet madre. Una wavelet es una onda que puede tener una forma irregular y una duración limitada en tiempo, en la cual se concentra la energía la señal. La wavelet se define como el cuadrado de una función integrable  $\psi(t)$  que cumple con la condición de admisibilidad la cual implica que la transformada de Fourier de la función  $\psi(t)$  se desvanece en el valor de frecuencia cero. El proceso a través del cual una señal se descompone analizándola con una familia de wavelets escaladas y trasladadas es lo que se conoce como transformada wavelet. Cuando la transformada se realiza en forma discreta se conoce como DWT y la expresión que representa la transformada es (3).

$$wt(j, k) = \langle x(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \quad (3)$$

donde  $\langle x(t), \psi_{j,k}(t) \rangle$  es la convolución de las funciones.

La DWT se puede entender como una representación de escala tiempo de una señal digital que se obtiene usando técnicas de filtrado digital que equivale a realizar la convolución de la señal con la respuesta al impulso de ciertos filtros. La señal pasa a través de una serie de filtros pasa altas para analizar las frecuencias altas y otra serie de filtros pasa bajas para las frecuencias bajas. Esto se conoce también como análisis multi-resolución, lo cual permite analizar la señal de interés en diferentes bandas de frecuencias y con diferentes resoluciones (Weeks (2007)).

## 3. MODELO DEL DFIG UTILIZANDO EL MEF

La elección del MEF para modelar el DFIG con una falla entre vueltas de un estator se debe a que la falla puede ser simulada tomando en cuenta el efecto que tiene la pérdida de vueltas en un devando, así como el cambio en inductancia y resistencia que se produce en él. Esto se pierde en otro tipo de modelos e incluso en plataformas experimentales donde se simula la falla a través de la conexión de resistencias externas. En esta sección se describe la forma en que fue construido el modelo del DFIG. Se describe la geometría de acuerdo a (Cheng et al. (2013)), luego se muestran las características de la malla del modelo. Por último se pormenoriza la física del DFIG en sus diferentes componentes.

### 3.1 Geometría del DFIG

El DFIG es similar en construcción a la máquina de inducción con rotor devanado, por lo que posee devanados tanto en estator como en rotor. Las características geométricas de la sección transversal del estator y del rotor se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Datos geométricos de estator y rotor.

Característica	Estator	Rotor
Número de ranuras	45	36
Diametro exterior	182 mm	126.661 mm
Diametro interior	127 mm	50 mm
Largo	155 mm	155 mm

### 3.2 Mallado de la geometría del DFIG

La simulación de fenómenos naturales en superficies a través del MEF, implica la construcción de una malla que divida toda la geometría, esto último se hace a través de la formación de aristas, las aristas resultan de la unión de puntos, llamados nodos. La unión de las aristas con otras aristas da como resultado la formación de caras o elementos, que en dos dimensiones se presentan de forma triangular o cuadrada. En los nodos de los elementos se calculan las soluciones de las ecuaciones diferenciales que describen físicamente ese lugar geométrico. Las partes de la geometría que no contienen nodos son evaluadas a través de interpolaciones (Bastos and Sadowski (2003)). La malla en la geometría de dos dimensiones del DFIG se creó de forma manual, para alcanzar un número de elementos adecuado para cada parte del DFIG y que sus formas fueran óptimas. De manera resumida se presentan los elementos de la malla en la tabla 3. La malla en la geometría completa se muestran en la figura 1.

### 3.3 Física del estator del DFIG

El MEF requiere que los elementos geométricos tengan un significado físico, es decir, que las partes de la geometría sean asignadas a un elemento real del DFIG y a un material específico. El DFIG de estudio cuenta con núcleos de

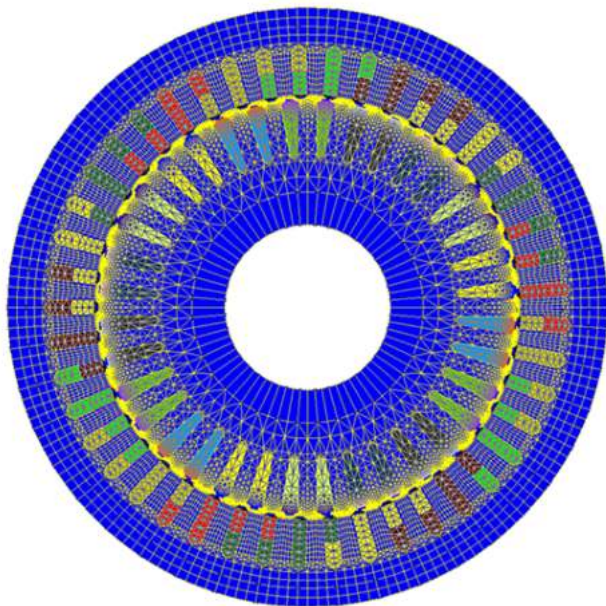


Figura 1. Detalle del mallado de la geometría del DFIG.

Acero  $D23 - 50$  tanto para estator como para rotor. Los devanados de estator y rotor son de cobre  $75^\circ$  y la parte de entrehierro es considerada como aire.

Se asigna también la dinámica de la mecánica del DFIG, asociando el núcleo del rotor y los devanados del rotor a un conjunto mecánico móvil, que gira con respecto a un eje fijo. El núcleo del estator y el devanado del estator se asocian a un conjunto mecánico fijo. Los devanados y su disposición tanto en rotor como en estator se establecen asignando el material, en este caso cobre, a la geometría. Se les asigna grupo de bobinas, número de vueltas, polaridad de la bobina, factor de relleno y se especifica a qué fase pertenecen. También se asignan los valores de resistencia e inductancia a cada devanado de cada fase. Y se realizan las conexiones pertinentes entre devanados y alimentaciones de la máquina. La tabla 4 describe las características del devanado del estator.

#### 4. SIMULACIÓN EMPLEANDO EL MEF

La simulación utilizando MEF del DFIG se resuelve de acuerdo a un escenario de solución impuesto. El escenario fue planteado en condiciones de funcionamiento real, con una simulación con respecto al tiempo, con un periodo de muestreo de  $1.33 \text{ ms}$  y un tiempo de simulación de  $6.3 \text{ s}$ .

Tabla 3. Resumen de los elementos de la malla del modelo del DFIG.

Elemento	Cantidad
Nodos	64365
Líneas	11514
Superficies	30580
Elementos de excelente calidad	76.78 %
Elementos de buena calidad	13.76 %
Elementos de calidad promedio	9.46 %

En el periodo de tiempo de la simulación se contempla el arranque, un periodo de par nulo y un periodo con par de plena carga. En el mismo escenario se provoca una falla de corto circuito entre vueltas en uno de los devanados del estator del DFIG con par a plena carga. En los periodos de par nominal en estado sano y par nominal con falla se contemplan señales digitales de 2048 datos cada periodo.

El resultado de la simulación, es el comportamiento de las variables electromagnéticas del DFIG de acuerdo al escenario de solución impuesto. Una de las variables que permite observar el escenario completo de simulación son las corrientes del estator, que se muestran en la figura 2, cuya curva de la amplitud de la corriente con respecto al tiempo proyecta las diferentes condiciones de la simulación del DFIG.

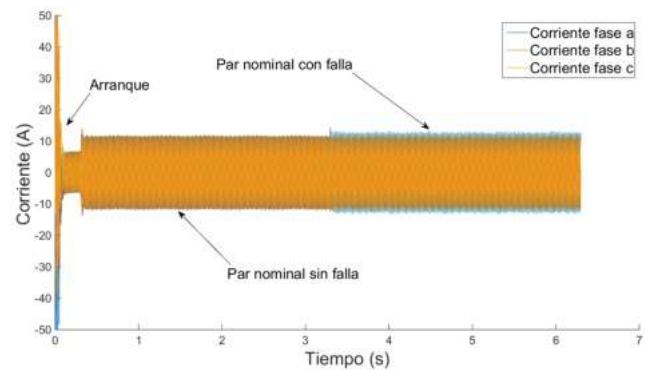


Figura 2. Corriente del estator del DFIG.

##### 4.1 Caso sin falla

El caso donde el DFIG se presenta trabajando con par nominal, con su impedancia balanceada y corrientes balanceadas se denomina el caso sano del análisis del DFIG. En esta sección se muestra el detalle de las señales trifásicas de corriente del estator del DFIG con respecto al tiempo en la figura 3. Las características del devanado del estator del DFIG se presentan en la tabla 4.

##### 4.2 Caso con falla

La falla de cortocircuito entre espiras en una fase del estator se provoca desde el modelo del DFIG, variando los parámetros de inductancia, resistencia y número de vueltas. En este caso el circuito eléctrico no varía en topología

Tabla 4. Características del devanado del estator del DFIG.

Elemento	Valor
Conductores por ranura	24
Factor de relleno	74.3 %
Ramas en paralelo	1
Capas de devanado	2
Forro de ranura	0.3 mm
Medida del conductor	1.16 mm
$R_s$	0.0805246 $\Omega$
$L_s$	3.9921 mH

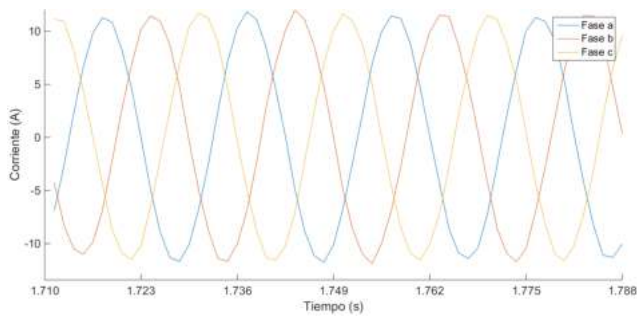


Figura 3. Señal de corriente del estator del DFIG en estado sano.

con respecto al caso sano, sólo cambian los parámetros de la fase a; la geometría del modelo tampoco varía. La falla que se provoca representa el 5% del devanado de la fase a del estator, los parámetros correspondientes se dan en la tabla 5. El detalle de las señales trifásicas de corriente del estator del DFIG con falla de cortocircuito entre espiras, se muestra en la figura 4.

Tabla 5. Parámetros de falla en la fase a del DFIG.

Elemento	Valor
Inductancia	3.792495 mH
Resistencia	0.7649837 $\Omega$
Número de vueltas	171

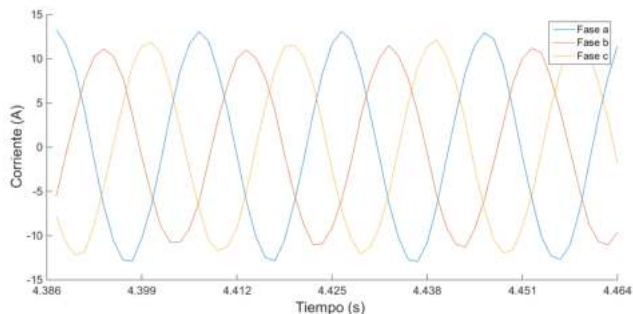


Figura 4. Señal de corriente del estator del DFIG con falla.

## 5. DETECCIÓN DE LA FALLA

A partir de la obtención de las corrientes del estator en los diferentes escenarios de operación, se aplicaron las técnicas de detección de fallas descritas en la sección 2. Las corrientes para los casos sano y con falla en el marco de referencia  $abc$  se mapearon al marco  $\alpha-\beta$  para construir con ellas el módulo de vector de Park de ambas señales trifásicas.

A partir de estas señales se realizó la detección de fallas, comparado el resultado de la descomposición en frecuencias de las señales del módulo del vector de Park con y sin falla a través de la FFT. La figura 5 muestra el resultado de la aplicación de la FFT para ambos casos, se puede observar una componente en el doble de la frecuencia

de operación del estator de la máquina eléctrica  $2f$ , es decir,  $100\text{Hz}$  para el caso con falla. También en 5, se puede observar que el modelo del MEF presenta algunas componentes de frecuencia diferentes a  $f$  y a  $2f$ , esto se debe a que el modelo toma en cuenta aspectos de la geometría y la respuesta de los materiales a los campos electromagnéticos. Aún así existen efectos que no se toman en cuenta en el modelo como la posible influencia de factores mecánicos u otros fenómenos que pudieran causar ruido en la señal, pero en la comparativa del caso sano con el caso con falla la firma que se presenta en  $2f$  es inherente a una falla de cortocircuito entre vueltas.

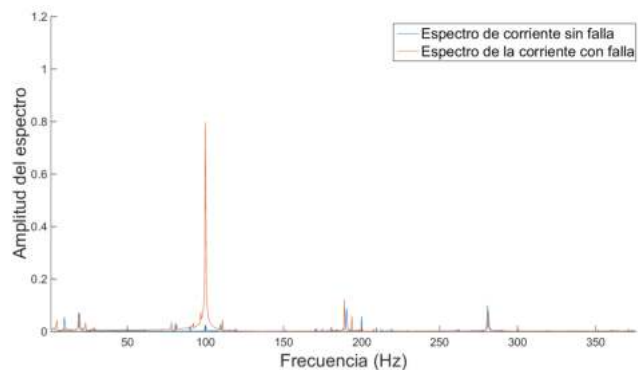


Figura 5. Comparación de la FFT del vector de Park de las señales de corriente con y sin falla.

Con la finalidad de evitar falsas alarmas y aumentar la confiabilidad en la detección de una falla, se propone un sistema redundante de detección de fallas basado en la DWT, observando los cambios en el valor RMS de los coeficientes wavelet de cada nivel de descomposición del módulo del vector de Park para los casos sano y con falla. La falla de cortocircuito entre espiras se detectó con la presencia de una diferencia del valor RMS del nivel de descomposición correspondiente a la banda de frecuencia en cuyo rango se ubicó el doble de la frecuencia de operación. La DWT se puede implementar con diferentes wavelets madre, para este análisis se emplearon las siguientes wavelets: Haar, Daub4, Daub6 y Coif6 para efectuar un análisis comparativo con el fin de determinar la capacidad de detección de la falla de estator del DFIG de cada una de ellas (Gao and Yan (2011)).

De acuerdo al valor RMS de los coeficientes wavelet por banda de descomposición, se logra la detección de un cambio significativo en la magnitud RMS en la segunda banda, que corresponde al rango de 94 a 188 Hz, en la cual se ubica la frecuencia correspondiente al doble de la frecuencia de operación del estator de la máquina eléctrica ( $100\text{Hz}$ ). En este caso la DWT con la wavelet Daub4 presenta una mayor sensibilidad, aunque los resultados obtenidos con las wavelets Daub6 y Coif6 son similares de acuerdo a la tabla 6.

Tabla 6. Valor RMS de los coeficientes wavelet para la falla de estator del DFIG con diferentes wavelets.

Wavelet	Diferencia (Valor RMS)	Banda de frecuencia	Rango de frecuencia
Haar	0.121532	2da banda	94-188 Hz
Daub4	0.903534	2da banda	94-188 Hz
Daub6	0.716178	2da banda	94-188 Hz
Coif6	0.896369	2da banda	94-188 Hz

## 6. CONCLUSIONES

Se observó, por medio de la FFT del módulo del vector de Park, que la corriente del estator del DFIG para un aerogenerador presentó una componente del doble de la frecuencia fundamental de operación de la máquina eléctrica en presencia de falla de cortocircuito entre espiras; de la misma manera en que ocurre en otro tipo de máquinas eléctricas como las de inducción jaula de ardilla y las máquinas síncronas de imanes permanentes. Se realizó una detección de fallas redundante a través de la DWT con wavelets Haar, Daub4, Daub6 y Coif6 obteniéndose resultados similares con las últimas tres.

## REFERENCIAS

- Abad, G., López, J., Rodríguez, M., Marroyo, L., and Iwanski, G. (2011). *Doubly fed induction machine: Modeling and control for wind energy generation*. Wiley-IEEE Press, USA.
- ALTAIR, F. (2016). *Induction motor tutorial 2D technical example*. Altair engineering Inc., France.
- Artigao, E., Martín, S., Honrubia, A., and Gomez, E. (2018). Wind turbine reliability: A comprehensive review towards effective condition monitoring development. *Applied Energy*, 228, 1569–1583.
- Bastos, J.P.A. and Sadowski, N. (2003). *Electromagnetic modelling by finite element methods*. CRC Press, USA.
- CEDRAT (2009). *User guide Flux 11.2*. CEDRAT, France.
- Cheng, P., Li, F.Y., and Li, J.H. (2013). Design and simulation analysis of doubly fed induction generator wind turbines. *Applied mechanics and materials*, 260, 142–147.
- Craciunescu, A., Ciumbulea, G., and Media, M. (2012). Phase-modulus diagram of instantaneous current's space phasor as diagnosis tool of induction motor's stator windings. In *International conference of renewable energies and power quality*, 108–111. España.
- Fried, L., Shukla, S., and Sawyer, S. (2017). Chapter 26 - growth trends and the future of wind energy. In T.M. Letcher (ed.), *Wind Energy Engineering*, 559 – 586. Academic Press.
- Gao, R.X. and Yan, R. (2011). *Wavelets, theory and applications for manufacturing*. Springer, USA.
- Grainger, J. and Stevenson, J.W. (1996). *Análisis de sistemas eléctricos de potencia*. Mc Graw Hill, USA.
- Gritli, Y., Bellini, A., Rossi, C., Casadei, D., Filippetti, F., and Capolino, G. (2017). Condition monitoring of mechanical faults in induction machines from electrical signatures: Review of different techniques. In *2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, 77–84.
- GWEC (2018). *Global Wind Energy Council*. Global Report: Annual Market, Brussels.
- Ko, Y., Lee, K., Lee, D., and Kim, J. (2012). Fault diagnosis of three-parallel voltage-source converter for a high-power wind turbine. *IET Power Electronics*, 5(7), 1058–1067.
- Maldonado-Ruelas, V.A., Villalobos-Piña, F.J., Sosa-Serna, G.A., Alvarez-Salas, R., Pazos-Flores, F., and Alvarez-Salas, J.A. (2016). In-wheel brushless dc motor test-bed for control and fault detection. In *2016 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 1–5.
- Milanez, D.L. and Emanuel, A.E. (2003). The instantaneous-space-phasor: A powerful diagnosis tool. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 52(1), 143–148.
- Ngamroo, I. (2017). Review of dfig wind turbine impact on power system dynamic performances. *IEEE Transactions on electrical and electronic engineering*, 12, 301–311.
- Peeters, C., Guillaume, P., and Helsen, J. (2018). Vibration-based bearing fault detection for operations and maintenance cost reduction in wind energy. *Renewable Energy*, 116, 74 – 87.
- Pinar, J., P.García, F., Tobias, A., and Papaalias, M. (2013). Wind turbine reliability analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 463–472.
- Qiao, W. and Lu, D. (2015). A survey on wind turbine condition monitoring and fault diagnosis—part i: Components and subsystems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62, 6536–6545.
- Shahriar, M.R., Borghesani, P., Ledwich, G., and Tan, A.C. (2018). Performance analysis of electrical signature analysis-based diagnostics using an electromechanical model of wind turbine. *Renewable Energy*, 116, 15 – 41. Real-time monitoring, prognosis and resilient control for wind energy systems.
- Shipurkar, U., Ma, K., Polinder, H., Blaabjerg, F., and Ferreira, J. (2015). A review of failure mechanisms in wind turbine generator systems. *17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*, 1, 1–10.
- Singh, G., Anil Kumar, T., and Naikan, V. (2016). Induction motor inter turn fault detection using infrared thermographic analysis. *Infrared Physics & Technology*, 77, 277–282.
- Sun, L., Xu, B., Du, W., and Wang, H. (2016). Model development and small-signal stability analysis of dfig with stator winding inter-turn fault. *IET Renewable Power Generation*, 11-3, 338–346.
- Walker, J.S. (2008). *A primer on Wavelets and their specific applications*. Chapman & Hall/CRC, USA.
- Weeks, M. (2007). *Digital signal processing using MATLAB and wavelets*. Infinity Science Press LLC, USA.