

# **DETECCIÓN DE FALLAS INCIPIENTES DE CORTOCIRCUITO EN EL ESTATOR DE UN AEROGENERADOR (PMSG) BASADO EN LAS TRANSFORMADAS DE FOURIER Y ONDELETA**

*DETECTION OF INCIPIENT SHORT-CIRCUIT FAULTS IN THE  
STATOR OF A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS  
GENERATOR (PMSG) BASED ON FOURIER  
AND WAVELET TRANSFORMS*

***José de Jesús Ramos Rodríguez***

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México  
*g22153221@aguascalientes.tecnm.mx*

***Francisco Javier Villalobos Piña***

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México  
*francisco.vp@aguascalientes.tecnm.mx*

***Josué Augusto Reyes Malanche***

Universidad Tecnológica de Aguascalientes, México  
*josue.malanche@utags.edu.mx*

***Efraín Ramírez Velasco***

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México  
*r21153203@aguascalientes.tecnm.mx*

***Carlos Humberto Saucedo Zárate***

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México  
*carloshum777@hotmail.com*

**Recepción:** 8/diciembre/2024

**Aceptación:** 27/diciembre/2024

## **Resumen**

Con el aumento de los sistemas alternativos de energía surgen nuevas problemáticas, las cuales pueden ser fallas del tipo: eléctricas y/o mecánicas. La presente investigación se centra en el estudio de fallas incipientes en los devanados del aerogenerador síncrono de imanes permanentes (PMSG) de 400 W, el cual fue alterado para poder inducir diferentes escenarios de falla. Se utilizan las herramientas transformadas discretas de Fourier y ondeleta, por medio de un sistema fruto de una investigación previa [Ortiz, 2021] basado en un procesador

dsPIC30F4011 y sensores de efecto Hall, y mediante el uso de un programa de computadora de alto nivel desarrollado en Delphi XE7 el cual permite la descarga de información y almacenamiento en el equipo de cómputo. Con base en los resultados experimentales se logra la detección de fallas incipientes.

**Palabras Clave:** Detección de fallas, Fallas eléctricas, Generador síncrono de imanes permanentes, Transformada discreta Ondeleta, Transformada discreta de Fourier.

## **Abstract**

*With the increase in alternative energy systems, new problems arise, which can include electrical and/or mechanical faults. This research focuses on the study of incipient faults on the windings of a 400 W PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generators), which was altered to induce different fault scenarios. Discrete Fourier and wavelet transforms are used through a system developed in a previous study [Ortiz, 2021], based on a dsPIC30F4011 processor and Hall effect sensors, along with a high-level computer program developed in Delphi XE7 that enables data download and storage in the computer. According to the experimental results it is possible to detect incipient faults.*

**Keywords:** *Discrete Fourier transform, Discrete Wavelet transform, electrical faults, Fault detection, Permanent Magnet synchronous generator.*

## **1. Introducción**

A raíz de la situación económica, social y ambiental, además del daño que provocan las energías no renovables, como la quema de hidrocarburos la cual contamina no solo el aire, sino también los mantos acuíferos, se ha decidido apuntar hacia modelos de desarrollo sustentables. La energía eólica es una de las energías limpias que ha presentado un mayor crecimiento en los últimos años, esto debido a que la caída de los precios para desarrollarla descendió hasta en un 72% durante la última década, dando un aproximado de generación de 50 MW de energía tenga un costo aproximado de \$26 USD Si se tiene en cuenta que los aerogeneradores tienen un promedio de vida útil de entre 20 y 25 años, se debe considerar la

importancia de su funcionamiento [AMDEE, 2021]. Un aspecto importante para cuidar el correcto funcionamiento de los aerogeneradores es el mantenimiento al generador eléctrico, el cual en su mayoría suele ser un generador síncrono de imanes permanentes, debido a que al no contar con un colector o un par de anillos se elimina el rozamiento interno en la máquina, evitando así bajo rendimiento y el calor generado por la fricción del rozamiento [Chapman, 2012].

Una correcta aplicación del mantenimiento preventivo y/o predictivo juega un papel fundamental para evitar grandes pérdidas económicas, así como el mejoramiento de los tiempos de trabajo de la máquina. Existen diferentes tipos de fallas que pueden afectar a los PMSG de diferentes maneras, estas fallas suelen definirse en dos tipos, mecánicas y eléctricas. Las fallas mecánicas son fractura de imanes [Ismagilov, 2019] y fallas de rodamientos [Kudelina, 2020] las cuales se encuentran dentro de las más comunes. Existen varios tipos de fallas eléctricas, las cuales tienen su propio conjunto de problemas, estas fallas pueden presentarse por diferentes situaciones, como lo son: cambios mecánicos, térmicos o en tensión de la red eléctrica. Para la detección de fallas eléctricas se utiliza comúnmente la medición de señales de corriente y del flujo magnético del estator, ya que estas contienen información de las condiciones de salud de los devanados [Irhumah, 2019].

Una de las técnicas más efectivas para la detección de fallas eléctricas es el análisis de las firmas de corrientes del estator (MCSA). Al analizar las corrientes de firma (los armónicos) obtenidas es posible efectuar la detección de anomalías, lo cual indica un mal funcionamiento, dichos armónicos muestran diferentes espectros de frecuencia dependiendo de la falla del motor, así como de su severidad al ser analizadas con herramientas tiempo – frecuencia [Choudhary, 2018]. Por ejemplo, se puede abordar la detección de fallas de circuito abierto en los dispositivos de conmutación, en los diodos de enclavamiento y en los condensadores del enlace de corriente directa (CD) con ayuda de la Transformada ondeleta discreta (DWT) para los aerogeneradores que funcionan con un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) [de la Rosa, 2019]. Así mismo se construye un banco de trabajo diseñado con base en una máquina de corriente directa y un sistema electrónico de

potencia que permite imitar las variaciones de velocidad del comportamiento del viento. Las corrientes trifásicas se transforman y se analizan utilizando el vector de Park en una máquina síncrona de imanes permanentes para la detección de fallas eléctricas en el estator, con la ayuda de la FFT donde se detectan los circuitos abiertos provocados por cortos-circuitos entre espiras de los devanados del estator de la PMSG [Ortiz, 2018].

En otro trabajo se crea un sistema de detección de fallas para una máquina de imanes permanentes, mediante un banco de pruebas, y se analizan las corrientes trifásicas del estator con ayuda del vector de Park. Las corrientes se analizan utilizando la FFT, y la Transformada Discreta Ondeleta con diferentes Ondeletas madres, como lo son la Haar nivel 1, Daubechies 2, Daubechies 3 y Coiflet 5 [Ortiz-Medina, 2018].

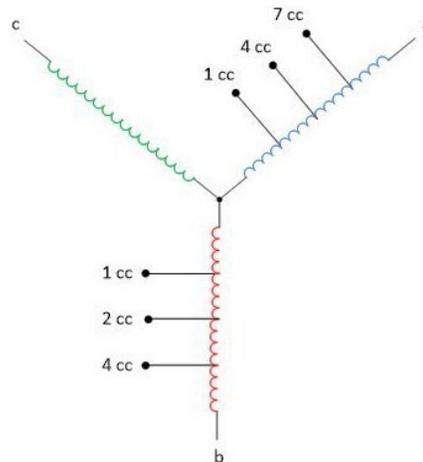
Se presenta una revisión de los métodos de estimación de vanguardia que facilitan los avances en la tecnología eólica, las tendencias recientes en la generación de energía y los desafíos en la modelización no lineal. El artículo de revisión permite a los lectores comprender las tendencias actuales en los métodos de estimación de estado y los problemas relacionados con el diseño de controles, filtrado y observadores de estado. Finalmente, la conclusión de la revisión demuestra la dirección de las investigaciones futuras [Mayilsamy, 2023].

## **2. Métodos**

### **Diagnóstico de fallas eléctricas en el PMSG**

En el presente trabajo se expone el diagnóstico de fallas incipientes eléctricas del estator del PMSG, para lograrlo se alteró un PMSG de 400 W el cual fue re devanado para inducir diferentes escenarios de falla, se efectuaron alteraciones en la *fase a* induciendo 1 , 4 y 7 *espiras* en cortocircuito la cuales representan un porcentaje de falla de 0.5, 2% y 4.5% respectivamente en el devanado (1 , 4 y 7 *cc*) y la *fase b* induciendo 1 , 2 y 4 *espiras* en cortocircuito la cuales representan un porcentaje de falla del 0.5%, 1% y 2% respectivamente en el devanado (1 , 2 y 4 *cc*), Figura 1. Para el presente estudio, se utilizó un sistema electrónico de potencia y un sistema de control basado en un procesador de señales digitales de bajo costo,

el cual es capaz de generar patrones de viento mediante el seguimiento de velocidad de un motor de CD, el modelo CMGR-DC03 de la marca CIMGAR, el cual esta acoplado mediante una banda a un PMSG de 400 W y 12 V.

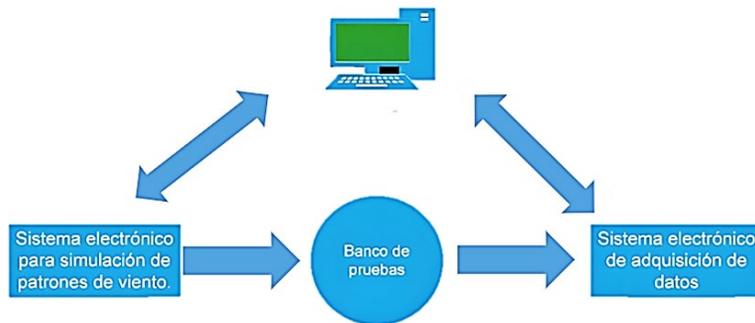


*Fuente: Ortiz Medina R. 2021*

Figura 1 Diagrama esquemático de la alteración del PMSG.

El sistema consiste básicamente en un control de seguimiento de velocidad de tipo PID discreto, para la medición de velocidad se utiliza un sensor de efecto Hall A3144 de Allegro MicroSystem Inc., lo cual se logra mediante el módulo de captura del procesador, mediante la sintonización realizada por un proceso de identificación experimental de la planta. Para lograr dicha identificación se aprovechó el diseño de un programa de computadora visual de alto nivel desarrollado en el lenguaje de programación Embarcadero Delphi XE7, dicho programa además de la identificación permite el control, la asignación y descarga de patrones de viento gracias a un recurso de memoria de gran capacidad tipo SD la cual se encuentra en el sistema embebido. Existe un segundo sistema que permite efectuar la adquisición de señales de corrientes del estator, basado en el mismo procesador de la compañía Microchip el dsPIC30f4011, el cual efectúa comunicación de la misma manera que el sistema anterior con una computadora personal mediante una interfaz del tipo USB-Serial de alta velocidad para lo cual se utiliza un transceiver el FTDI-232. Para el control y manipulación de ambos sistemas se desarrolló un programa de computadora en el mismo lenguaje visual que permite la lectura y

almacenamiento de paquetes de datos. En la Figura 2 se ilustra un diagrama a bloques en el cual se describe el funcionamiento del sistema descrito.



Fuente: elaboración propia

Figura 2 Esquema del sistema patrones de viento y adquisición de datos.

### Falla eléctrica incipiente en el PMSG

Las fallas eléctricas más comunes en los PMSG son fallas de corto circuito entre espiras de una bobina, fallas de corto circuito entre espiras de diferentes bobinas, fallas de corto circuito a tierra y fallas de circuito abierto. Para el interés de la presente investigación se estudian las fallas de corto circuito entre espiras de una misma fase. Las fallas de corto circuito son las más comunes debido a las magnitudes de las corrientes que pueden circular por dichos devanados del estator, ocasionando en su mayoría un sobrecalentamiento en los mismos degradando así el material aislante del conductor [Choudary, 2018].

### Módulo del fasor espacial de Park

El vector de Park, también conocido como modulo del fasor espacial instantáneo de Park (ISP), es una herramienta que mapea las corrientes trifásicas a un marco de referencia bifásico, conocidas como corrientes  $d - q$ , si el marco de referencia es fijo se le conoce como transformada de concordia o  $\alpha - \beta$  lo cual permite la obtención del módulo del fasor cuya magnitud es sensible a los cambios de corriente causados por las fallas, lo cual lo hace una herramienta útil para el análisis de máquinas eléctricas en un estado desbalanceado [Ortiz-Medina, 2018].

El ISP toma como base las corrientes de magnetización de un sistema trifásico balanceado en estado estable, Ecuaciones 1, 2 y 3.

$$I_a = \hat{I} \cos(\omega_t + \phi) \quad (1)$$

$$I_b = \hat{I} \cos(\omega_t + \phi - 120) \quad (2)$$

$$I_c = \hat{I} \cos(\omega_t + \phi + 120) \quad (3)$$

Donde  $I_a$  es la corriente de estator de la *fase a*,  $I_b$  es la corriente de estator de la *fase b*,  $I_c$  es la corriente de estator de la *fase c*,  $\hat{I}$  es la magnitud de la corriente,  $\omega$  es la velocidad angular eléctrica,  $f$  es la frecuencia fundamental de la red eléctrica y  $\phi$  es el ángulo de fase de las señales corriente.

Una forma simple de determinar el efecto que tiene el desbalance causado por la falla de una señal de corriente de una máquina eléctrica es utilizar el módulo del ISP. La transformada de Concordia se muestra en la Ecuación 4. Una vez obtenidas  $i_\alpha$  e  $i_\beta$  se obtiene el módulo del ISP, Ecuación 5.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & \cos\left(\frac{-2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$ISP = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \quad (5)$$

### Frecuencias de firma de falla

Utilizando el módulo del ISP es posible obtener los espectros de firma de falla, para el caso particular de fallas eléctricas del estator la firma de falla aparece en múltiplos del doble de la frecuencia fundamental  $f$  como se muestra en la Ecuación 6 [Ortiz-Medina, 2021]. Para el caso práctico se considera  $n = 1$  como se ilustra en la Ecuación 7. Donde  $f_f$  es la frecuencia de firma de falla en *Hz*.

$$f_f = 2nf \quad (6)$$

$$f_f = 2f \quad (7)$$

### Transformada rápida de Fourier

La transformada rápida de Fourier (FFT), es procedimiento que permite eficientizar de manera computacional la transformada discreta de Fourier (DFT)

Ecuación 8, en donde al tener una DFT de tamaño  $N$  se pueden realizar diezmados en lugar de computar una DFT demasiado grande, esta se divide para realizar la computación de varias DFT más pequeñas y por ende con mayor velocidad, esto cuando el tamaño de la DFT consiste en  $N^2$  y cuando es una potencia de  $N^4$  [Proakis, 2007].

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2k\pi n/N}, k = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (8)$$

Donde:

$X(k)$  : Secuencia en el dominio de la frecuencia

$x(n)$  : Secuencia en el dominio temporal

### Transformada discreta de Ondeleta

La transformada discreta de Ondeleta, descompone una señal del dominio del tiempo, que varían en duración conocidas como "Ondeletas", pueden ser utilizadas para una gran variedad de tareas fundamentales en el procesamiento digital de señales [Walker, 2008]. Para las aplicaciones en las cuales se necesita un bajo costo computacional, así como una reducción en la cantidad de datos, es necesario eliminar la redundancia de la señal, esto se logra discretizando la señal.

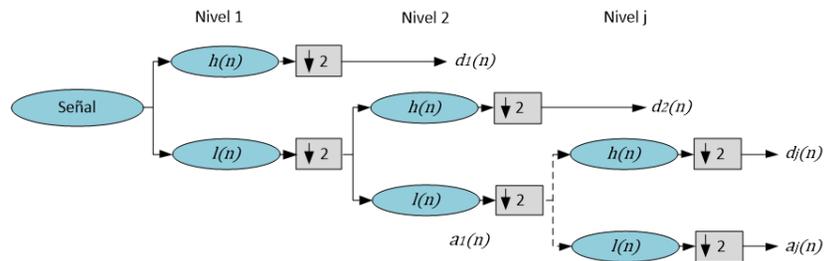
Para la presente investigación se utiliza el análisis multiresolución (MRA), el cual consiste en descomponer una señal del dominio del tiempo en diferentes bandas de frecuencia utilizando una Ondeleta madre, la Figura 3 muestra el esquema MRA, la Ondeleta más simple es la de Haar cuyos coeficientes se muestran en las Ecuaciones 9 y 10. Donde  $a_m$  es el coeficiente de aproximación y  $d_m$  el de detalle.

$$a_m = \frac{f_{2m-1} + f_{2m}}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

$$d_m = \frac{f_{2m-1} - f_{2m}}{\sqrt{2}} \quad (10)$$

### Sistema de adquisición de corrientes trifásicas del PMSG

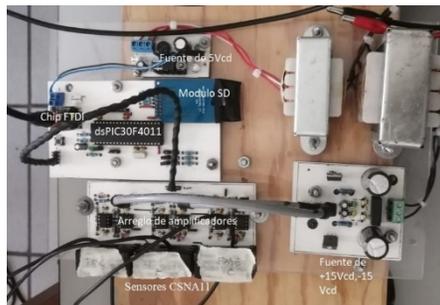
Para la adquisición de señales de las corrientes del estator del PMSG se utilizan 3 sensores efecto Hall de la compañía Honeywell, modelo CSNA111 lazo cerrado.



Fuente: Walker, 2008

Figura 3 Proceso de descomposición de una señal con MRA.

El sensor de corriente requiere de una alimentación bipolar de  $\pm 15\text{ Vcd}$ , con un rango de medición de corriente de  $\pm 35\text{ A}$ , el sensor tiene una relación de conversión con salida a corriente de  $1\text{ mA}$ . por cada amperio medido. El sistema embebido cuenta con una memoria flash de alta capacidad tipo SD para el almacenamiento de datos. La Figura 4 muestra el sistema de adquisición de datos utilizado.

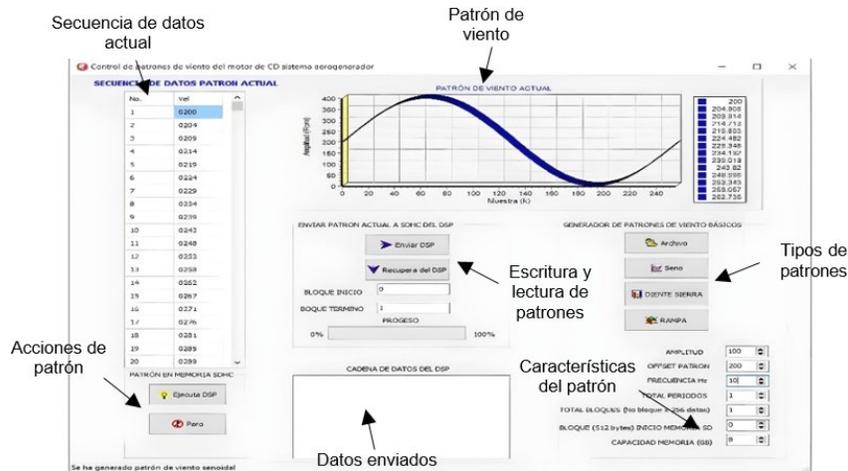


Fuente: elaboración propia

Figura 4 Implementación del sistema de adquisición.

## Interfaces de computadora

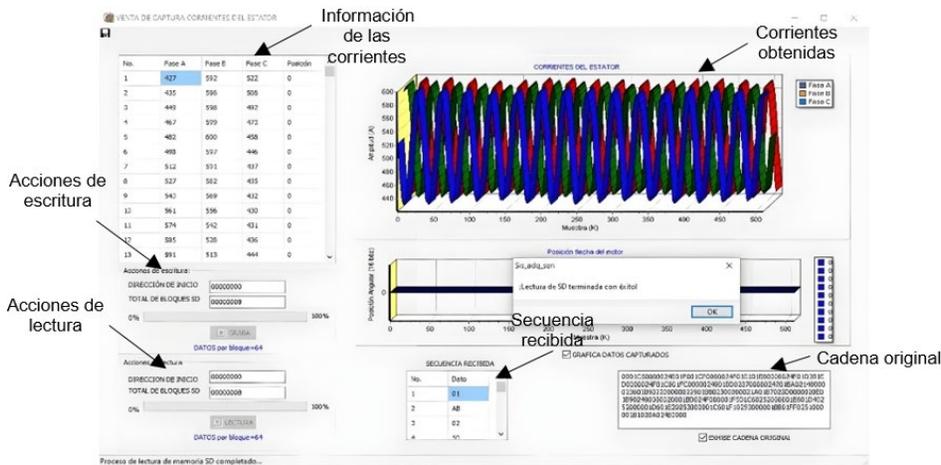
El primer programa de computadora permite el control del sistema electrónico de potencia, la carga y la descarga de patrones de viento se muestra en la Figura 5. El programa puede generar diferentes tipos de patrones arbitrarios de viento (senoidal, triangular, etc.), el cual permite modificar las características de amplitud, frecuencia y niveles de offset de velocidad, así como la carga de patrones de viento provenientes de centros meteorológicos. La interfaz interactúa con la memoria de almacenamiento tipo SD la cual permite seleccionar la sección de memoria en la cual se alojan los patrones de viento, las características de la señal, borrado y prueba de dicha memoria.



Fuente: elaboración propia

Figura 5 Interfaz para simular diferentes patrones en el motor.

El segundo programa de computadora es una interfaz que permite la adquisición de corrientes del estator con diferentes rangos de frecuencia, el almacenamiento y la extracción de datos. La Figura 6 muestra la ventana del programa de computadora.



Fuente: elaboración propia

Figura 6 Interfaz para adquisición de señales trifásicas de corriente.

### 3. Resultados

#### Descripción del caso de estudio experimental

Los resultados presentados en esta sección fueron obtenidos con diferentes porcentajes de fallas incipientes, las cuales fueron del 2 y 4.5% la *fase a* del estator del PMSG. Para el análisis de los datos y poder diagnosticar la falla eléctrica, se

obtiene el módulo de ISP de las corrientes trifásicas del estator para su posterior análisis con diferentes herramientas tiempo frecuencia como lo son la transformada rápida de Fourier y la transformada discreta de Ondeleta para los escenarios de caso sano, como en el caso con falla. Para la adquisición de señales se utilizó una frecuencia de muestreo de 1 kHz, así como, un paquete de datos de más de 38400 muestras discretas.

### Resultados experimentales con la transformada rápida de Fourier

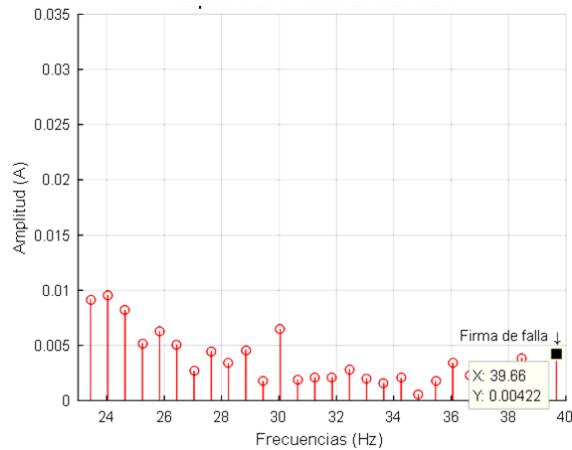
La frecuencia de firma de falla utilizando el módulo del ISP depende de la frecuencia de la corriente fundamental, la cual se obtiene en base al número de pares de polos que para este caso en particular son 6 pares, lo cual permite alcanzar una velocidad de 200 rpm., por lo que la frecuencia de corriente fundamental es de 20 Hz, por lo tanto, utilizando la Ecuación 5, la frecuencia de firma de falla para dicho escenario se presenta en 40 Hz. En la Tabla 1 se muestran los diferentes escenarios de falla propuestos para las pruebas.

Tabla 1 Escenarios de falla.

Numero de prueba	Fase A	Fase B	Fase C
1	Sin falla	Sin falla	Sin falla
2	Falla del 2%	Sin falla	Sin falla
3	Falla del 4.5%	Sin falla	Sin falla

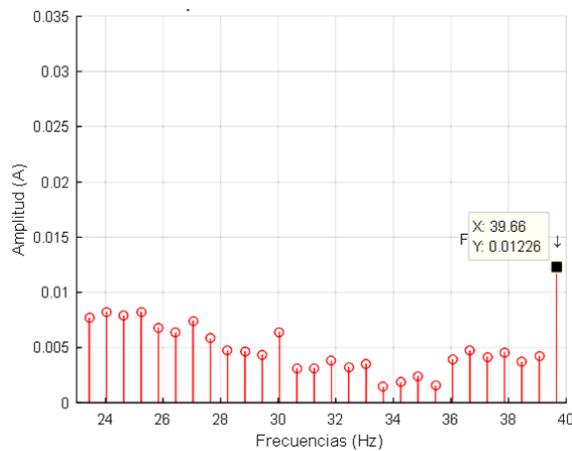
Fuente: elaboración propia

Los diferentes escenarios de firma de falla mostrados en la Tabla 1 fueron analizados mediante el uso de la FFT aplicada al módulo del ISP, en los cuales fue posible identificar el espectro de firma de falla. En la Figura 7 se ilustra el resultado experimental del análisis espectral para el caso sano, para la velocidad de 200 rpm., la frecuencia de firma de falla resulta al doble de la frecuencia fundamental 40 Hz, la magnitud del armónico de firma de falla es de 4 mA. En la Figura 8 se ilustra el resultado experimental del análisis espectral para el caso con falla en la fase a del 2%, para la velocidad de 200 rpm., la frecuencia de firma de falla resulta al doble de la frecuencia fundamental 40 Hz, la magnitud del armónico de firma de falla es de 12 mA.



Fuente: elaboración propia

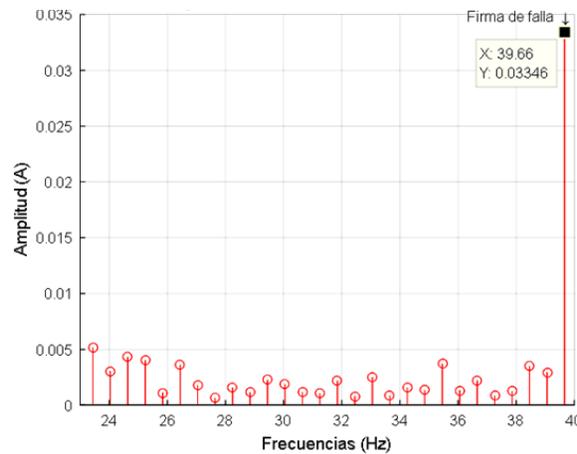
Figura 7 Espectro de frecuencias caso sano.



Fuente: elaboración propia

Figura 8 Espectro de frecuencias caso con falla 2%.

En la Figura 9 se ilustra el resultado experimental del análisis espectral para el caso con falla en la *fase a* del 4.5%, para la velocidad de 200 *rpm.*, la frecuencia de firma de falla resulta al doble de la frecuencia fundamental 40 *Hz*, la magnitud del armónico de firma de falla es de 33 *mA*. Como se puede observar al modificar un porcentaje del corto circuito de los devanados no se tiene un cambio proporcional en las corrientes, lo cual lleva a confirmar que existe un comportamiento no lineal. Al realizar un análisis comparativo de los espectros que se muestran en las Figuras 7, 8 y 9 se nota claramente el aumento de la magnitud de la frecuencia de firma de falla, por lo que se puede confirmar la presencia del corto circuito entre vueltas de la misma bobina de la *fase a*.



Fuente: elaboración propia

Figura 9 Espectro de frecuencias caso falla 4.5%.

### Análisis MRA del módulo del ISP

Como una herramienta redundante para lograr una mayor confiabilidad en el diagnóstico de fallas se utilizó el análisis MRA Ondeleta. Se utilizaron las Ondeletas madre de Haar, Daubechies2, Daubechies4 y coiflet4, con la finalidad de evaluar la mayor sensibilidad posible en la detección. Se calculó el valor eficaz de los coeficientes de detalle por banda de frecuencia utilizando la Ecuación 11.

$$RMS = \sqrt{\frac{(f_1)^2 + (f_2)^2 + \dots + (f_n)^2}{N_m}} \quad (11)$$

Donde  $f_1, f_2, \dots, f_n$  son los coeficientes de fluctuación del análisis con la Ondeleta y  $N_m$  el número de muestras del nivel de descomposición.

Para efectuar el análisis MRA se tomaron 38400 datos para lograr 15 niveles de descomposición a una frecuencia de muestreo de 1 kHz, en la banda número 4 con un rango de frecuencia de 31.25 a 62.5 Hz se encuentra la banda de interés de la firma de falla. Los resultados del análisis MRA para las Ondeletas de Haar, Daubechies2, Daubechies4 y Coiflet4 para el escenario de falla del 2% en corto circuito en la fase *a*, Tabla 2. Para el caso de la Ondeleta de Haar se tiene un incremento del 0.0006 unidades, la Ondeleta Daubechies2 muestra poca sensibilidad a la magnitud de la falla mostrando un decremento de 0.0041, para el caso de Daubechies4 se muestra también poca sensibilidad con un decremento del

0.0124, y para el caso de Coiflet4 se muestra poca sensibilidad obteniendo un decremento en el valor de la banda de 0.0113 para el caso sano y con falla. Los resultados del análisis MRA para las diferentes Ondeletas para el escenario de falla del 4.5% en corto circuito en la *fase a* se muestra en la Tabla 3.

Tabla 2 Caso con falla 2%.

Banda de frecuencia	Ondeleta	RMS caso sano	RMS falla	Diferencia RMS
31.25 - 62.5 Hz	Haar	0.2525	0.2531	0.0006
31.25 - 62.5 Hz	Daub2	0.2167	0.2126	-0.0041
31.25 - 62.5 Hz	Daub4	0.1705	0.1581	-0.0124
31.25 - 62.5 Hz	Coif4	0.1691	0.1578	-0.0113

Fuente: elaboración propia

Tabla 3 Caso con falla 4.5%.

Banda de frecuencia	Ondeleta	RMS caso sano	RMS falla	Diferencia RMS
31.25 - 62.5 Hz	Haar	0.2525	0.2554	0.0029
31.25 - 62.5 Hz	Daub2	0.2167	0.2104	-0.0063
31.25 - 62.5 Hz	Daub4	0.1705	0.1713	0.0008
31.25 - 62.5 Hz	Coif4	0.1691	0.1664	-0.0027

Fuente: elaboración propia

Para el caso de la Ondeleta de Haar se tiene un incremento del 0.0029 *unidades*, la Ondeleta Daubechies2 muestra poca sensibilidad a la magnitud de la falla mostrando un decremento de 0.0063, para el caso de Daubechies4 muestra un incremento del 0.0008, y para el caso de Coiflet4 se muestra poca sensibilidad obteniendo un decremento en el valor de la banda de 0.0027 para el caso sano y con falla.

Se concluye en el análisis MRA que la Ondeleta más simple de Haar la cual tiene solo dos coeficientes resulta tener mejor sensibilidad para la detección de fallas eléctricas del estator del PMSG.

#### 4. Discusión

En el presente trabajo se realizó un estudio comparativo de un PMSG en caso sano, así como el PMSG con fallas eléctricas de corto circuito entre espiras de una misma bobina en una sola fase a velocidad constante. El sistema desarrollado mostró ser capaz de diferenciar el caso sano del caso con falla, mediante el uso del

módulo de fasor espacial de Park así como de dos herramientas tiempo frecuencia logrando obtener el espectro de firma de falla característico mediante la herramienta FFT para fallas en una sola fase y se logró un cambio en los niveles efectivos de los coeficientes Ondeleta en la banda de frecuencia esperada. Se demostró que la Ondeleta de Haar a pesar de ser la herramienta más sencilla muestra la mejor sensibilidad para la detección de fallas eléctricas en este tipo de máquinas.

## **5. Conclusiones**

Se desarrolló un sistema de bajo costo para la detección de fallas eléctricas de corto circuito del estator de un PMSG el cual ha demostrado ser capaz de detectar las fallas incipientes de corto circuito entre espiras a una velocidad constante, aunque pudiera ser utilidad para detectar otro tipo de fallas eléctricas. Se validó la ocurrencia de los espectros de frecuencia de firma de falla en trabajos previos. Se modificó un banco de pruebas experimentales el cual permite además del estudio de las fallas a velocidad constante la capacidad de efectuar el análisis de fallas a velocidad variable, así como la capacidad de reproducir patrones de viento arbitrarios para trabajos futuros.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE), Informe anual, 2021.
- [2] Chapman S. J. Máquinas eléctricas. Mc Graw Hill, México, DF. 5ta edición, 2012.
- [3] Choudhary D. Goyal., Akula A. & Shimi. S. L., Condition monitoring and fault diagnosis of induction motors: A review. Archives of computational methods in engineering, Vol. 26, pp. 1221-1238, 2018.
- [4] De la Rosa Mendoza S. J., Álvarez Salas R., González García M., Cárdenas V., Pazos Flores F. & Villalobos Piña F. J., Detección de fallas en el convertidor de potencia con diodos de enclavamiento back-to-back de un sistema de generación eólica, Memorias del congreso nacional de control automático AMCA 2019, pp.489-494, octubre 2019.

- [5] Irhoumah M., Pusca R., Lefevre E., Mercier D., Romary R., Detection of the Stator Winding Inter-Turn Faults in Induction and Synchronous Machines through the Correlation Between Harmonics of the Voltage of Two Magnetic Flux Sensors, pp. 1-2, 2019.
- [6] Ismagilov Flyur R., Vavilov Viacheslav Ye, Bekuzin Vladimir I., Chirkov Vladislav S., Design Analysis of Submersible Brushless DC Motors for the Oil and Gas Industry.2019 IEEE Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences pp.1-2, 2019.
- [7] Kudelina K., Vaimann T., Rassölkin A., Asad B. & Kallaste A. Effect of bearing faults on vibration spectrum of bldc motor. 2020 IEEE Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences, pp. 1-6, 2020.
- [8] Mayilsamy, G.; Palanimuthu, K.; Venkateswaran, R.; Antonysamy, R.P.; Lee, S.R.; Song, D.; Joo, Y.H. A Review of State Estimation Techniques for Grid-Connected PMSG-Based Wind Turbine Systems. *Energies* 2023, 16, 634. <https://doi.org/10.3390/en16020634>.
- [9] Ortiz-Medina R. A., Villalobos Piña F. J., Álvarez Salas R., Esparza González M., Saucedo-Zarate C. H., Maldonado-Ruelas V. A., Detección de fallas de un aerogenerador basado en un PMSG, Memorias del congreso nacional de control automático AMCA 2018, pp.477-482, octubre 2018.
- [10] Ortiz Medina R. A., Villalobos Piña F. J, Maldonado Ruelas V. A., Álvarez Salas R., Park's Vector Analysis For Electrical Fault Detection In Stator Of Low Power Wind Turbine, *Pistas Educativas*, 2018.
- [11] Ortiz-Medina R. A., Diagnóstico de Fallas Eléctricas en Estator de Máquinas Eléctricas de Aerogeneradores, Instituto Tecnológico de Aguascalientes, mayo, 2021.
- [12] Proakis J. & Manolakis D. Tratamiento Digital De Señales, Pearson Education, 2007.
- [13] Walker J. A Primer on WAVELETS and Their Scientific Applications. Taylor & Francis Group, 2008.