

DIAGNÓSTICO DE FALLA ELÉCTRICA DEL ESTATOR EN MOTOR BLDC, UNA COMPARATIVA

DIAGNOSIS OF STATOR ELECTRICAL FAULTS ON BLDC MOTOR, A COMPARISON

Abraham Alvarado Laguna

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México
24153271@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

Carlos Humberto Saucedo Zárate

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

Efraín Ramírez Velasco

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

Recepción: 18/noviembre/2025

Aceptación: 24/diciembre/2025

Resumen

En el presente trabajo se expone una investigación sobre el diagnóstico de falla eléctrica del estator, aplicado a un motor sin escobillas de corriente directa BLDC (por sus siglas en inglés) de vehículo eléctrico ligero, el cual fue alterado en sus devanados para inducir diferentes escenarios de falla. El objetivo principal de la investigación es contar con un esquema de diagnóstico de tipo no invasivo, para ello, se utiliza el módulo del fasor espacial instantáneo de Park o ISP (por sus siglas en inglés). Para lograrlo se utiliza el análisis del módulo del ISP y se efectúa una comparativa mediante la transformada discreta de Fourier y la transformada discreta ondeleta. Con la investigación se logra validar de forma experimental el uso del módulo del ISP con señales de corriente de tipo trapezoidal, además de verificar la sensibilidad en la detección de diferentes escenarios de falla de las herramientas.

Palabras Clave: Diagnóstico de falla, motor BLDC, ondeleta, transformada discreta de Fourier, vehículo eléctrico.

Abstract

The present work exposes an investment in stator electric fault diagnosis applied to a light electric vehicle's brushless direct current (BLDC) motor, whose windings were modified to induce fault scenarios. The investment's primary goal is to obtain a non-invasive diagnosis schema using the Park's instantaneous space phasor (ISP) module. This is achieved by comparing the discrete Fourier transform and the discrete wavelet transform of the ISP module analysis. With the research it is possible to validate the use of the ISP module with trapezoidal current type signals and verify the sensitivity in the detection of the different fault scenarios of the mentioned tools.

Keywords: BLDC motor, discrete Fourier transform, electric vehicle, fault diagnosis, wavelet.

1. Introducción

Un tipo de máquina eléctrica ampliamente utilizada en vehículos eléctricos es el motor BLDC, que es una clase de motor síncrono de imanes permanentes en el rotor, este tipo de motor ha resuelto el problema del desgaste mecánico del rotor del motor debido al uso de escobillas y conmutadores utilizados en los motores de corriente continua con escobillas, supliéndolos por conmutadores electrónicos [Ali, 2024]. Tal es el crecimiento de este tipo de motor que existe la predicción reportada en la literatura que llegado el año de 2030 los motores de inducción serán reemplazados casi en su totalidad por motores BLDC [Mondragón, 2024]. Implementar motores BLDC en automóviles y bicicletas es un tema en el que se ha dado seguimiento en la literatura, con esto se busca mejorar el rendimiento de estos vehículos para que sean sustitutos serios de los vehículos a combustión y así reducir las emisiones de carbono.

A pesar de las ventajas que brinda el uso de este tipo de motor, debido a las cargas y a las condiciones de uso suelen generarse fallas en el estator, las cuales son

causa de un 30 a 40% de malfuncionamiento del motor BLDC, una de estas fallas y que es de interés del presente trabajo es la falla entre espiras [Pérez, 2023].

Referente a trabajos de diagnóstico de fallas en el estator de motores BLDC, existen algunos trabajos reportados en los que se han utilizado algoritmos tiempo-frecuencia para encontrar fallos en el estator del motor de manera temprana, tal es el caso de [Korkosz, 2021], en este trabajo se ha utilizado la transformada rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés) para encontrar una falla de cortocircuito en el estator por medio de señales de voltaje de un punto neutro artificial añadido a tres configuraciones del motor, las cuales son probadas, logrando detectar la falla en cualquier configuración del motor. La FFT también ha sido utilizada en [Du, 2023] para dar un preprocesamiento a señales de vibración de un motor en condiciones normales y con falla, obteniendo datos para la extracción de características y así entrenar un algoritmo de redes neuronales profundas de autocodificador disperso apilado (SSAE por sus siglas en inglés), con esta técnica se logra el diagnóstico inteligente del motor. El trabajo de [Shifat, 2020] aborda una comparativa del uso de señales de vibración y señales de corriente para detectar fallas en el estator, se realiza el análisis de vibración mecánica utilizando las técnicas del autograma y la curtosis rápida (FK por sus siglas en inglés), sin embargo, para fallas incipientes es complicado encontrar una diferencia que dictamine la existencia de una falla. Por otro lado, al utilizar el análisis de la firma de corriente del motor (MCSA por sus siglas en inglés) a partir de señales eléctricas, es posible encontrar fallas incipientes utilizando herramientas espectrales como la FFT, mostrando así mayores ventajas al realizar análisis a partir de señales eléctricas que a partir de señales de vibración mecánicas.

Por otro lado, en [Morel, 2023] se encuentran fallas en el inversor de un motor BLDC por medio de sus corrientes de fase, las señales son procesadas con funciones de entropía siendo validados los resultados con simulaciones en el programa de computadora Matlab. Así mismo existen trabajos en los que se utilizan algoritmos de Machine Learning, cuya extracción de características es por medio de herramientas tiempo-frecuencia, un ejemplo es [Susilo, 2024] en donde se ha utilizado para encontrar fallas en el estator de cortocircuito entre fases, el modelo

del vector de soporte de mínimos cuadrados (por sus siglas en inglés LSSV) utilizando como predictor una combinación de características de señales de vibración y de corriente por medio de la transformada de Fourier de tiempo corto (STFT por sus siglas en inglés) y la transformada ondeleta entre otros.

Referente a fallas de estator, además de los especificados en la presente sección, en [Usman, 2019] se realiza la detección de falla en tres tipos de falla en el estator, falla de bobina a bobina en una sola fase, falla de bobina a bobina en fases diferentes y falla entre espiras de bobina, por medio del modelo de elemento finito de un motor de imanes permanentes, utilizando el mismo programa de computadora, en [Jafari, 2020], se realiza el modelo de un motor BLDC en su condición sana y en condición de falla en espiras de bobina, además de realizar una fase experimental con un motor real, así mismo para detectar fallas de espiras en bobina, en [Park, 2014] se ha probado utilizar la impedancia como indicativo de falla, resultando en un algoritmo rápido de detección.

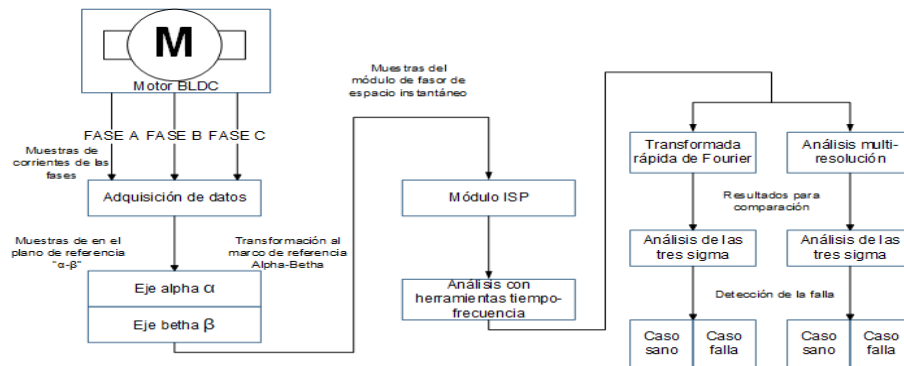
Un estándar utilizado ampliamente para la detección de falla entre espiras de bobina conocida como la prueba de impulso se expone en la norma [IEEE, 2004], la cual consiste en aplicar una tensión conocida en forma de impulso para medir la respuesta transitoria, en contraste, en técnicas de procesamiento de señales no es necesario aplicar tensiones diferentes a las de funcionamiento normal del motor. El presente documento expone un trabajo de tipo experimental sobre técnicas basadas en el procesamiento de señales para la detección de fallas eléctricas del estator de un motor de corriente directa sin escobillas BLDC, el estudio se limita a este tipo de motor y a la detección de falla en una sola fase debido a que el banco de pruebas se construyó en trabajos previos para este fin, de igual manera se realizan pruebas a velocidad constante como etapa previa a la realización de escenarios a velocidad variable en futuros trabajos.

2. Métodos

Descripción del esquema de detección de fallas

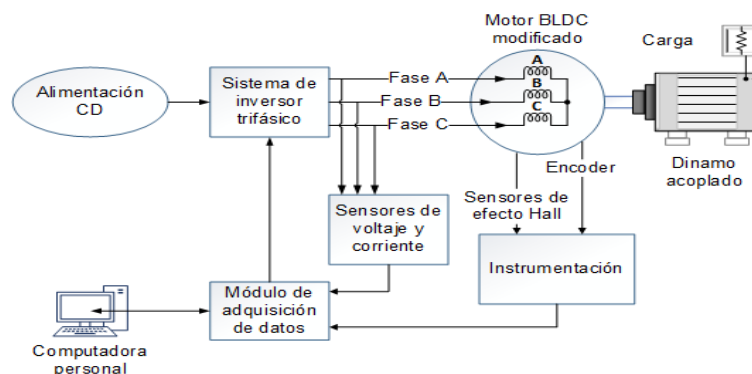
El esquema de diagnóstico de fallas, cuyo diagrama se presenta en la Figura 1, se basa en la adquisición de señales de corriente del estator experimentales del

motor BLDC. Esto se logra con base en un banco de pruebas experimentales el cual se ilustra en el diagrama de bloques de la Figura 2.



Fuente: elaboración propia

Figura 1 Diagrama a bloques del esquema de detección.



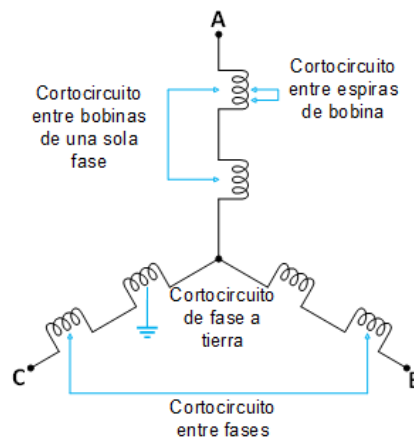
Fuente: elaboración propia

Figura 2 Diagrama de bloques del banco de pruebas experimentales.

Las corrientes del estator de naturaleza trapezoidal son mapeadas al marco de referencia de concordia alfa-beta, dicho marco de referencia es resultado de mapear las corrientes de Park al marco de referencia fijo. El módulo del fasor espacial de Park (ISP por sus siglas en inglés) se analiza mediante las herramientas tiempo frecuencia, la primera de ellas es la transformada discreta de Fourier (DFT por sus siglas en inglés), además, y de manera redundante se utiliza la transformada discreta ondeleta utilizando para ello el análisis multi-resolución (MRA por sus siglas en inglés). Para ello se utilizan las ondeletas madre de Haar nivel 1 y Daubechies nivel 4. Por último, se realiza el análisis estadístico de las tres sigmas realizando así el aislamiento y la detección de los diferentes escenarios de falla.

Falla en el estator de máquinas eléctricas

Una de las fallas más comunes que se presentan en motores eléctricos y en particular en el motor BLDC son los problemas de corto circuito en el devanado del estator, para estudiar el problema se cuenta con un motor alterado para inducir los diferentes escenarios de falla. En la Figura 3, se ilustran el detalle de alteración para inducir las fallas en el devanado del estator.



Fuente: elaboración propia

Figura 3 Fallas en el estator de motor eléctrico.

Se estudia la falla de corto circuito entre espiras de una fase. Los cortocircuitos de este tipo tienen un impacto significativo en las características eléctricas y magnéticas de un motor BLDC, tal como variaciones en la fuerza electromotriz (EMF por sus siglas en inglés), saturación magnética, corriente de entrada y la magnetización cruzada. Debido a un calor excesivo proporcional al cuadrado de la corriente circulante por el cortocircuito, se podría conducir rápidamente (pocos segundos) a la parada del motor, ese tiempo al ser muy corto, es un indicativo de que se debe de monitorear de manera continua el sistema para contribuir a la eliminación pronta de la falla y evitar daños subsecuentes a las bobinas adyacentes y al núcleo del estator. Con base en trabajos previos como en [Park, 2015], la frecuencia de firma de falla para problemas eléctricos en devanados del estator utilizando el módulo del ISP se presenta en múltiplos de la frecuencia de línea la cual se muestra en la Ecuación 1, la frecuencia de línea para el motor BLDC de vehículo eléctrico se puede obtener con base en la Ecuación 2.

$$f_{fun} = \frac{vel}{60} \cdot p \quad (1)$$

$$f_{falla} = 2 \cdot n \cdot f_{fun} \quad (2)$$

Donde:

f_{fun} : Frecuencia fundamental

vel : Velocidad de rotación en revoluciones por minuto

p : Número de pares de polos

f_{falla} : Frecuencia de falla

n : 1,2,3,...

Módulo del vector espacial instantáneo de Park (ISP)

Dado tres valores instantáneos de vectores correspondientes a un sistema trifásico F_a, F_b, F_c el cambio de marco de referencia de un espacio $a - b - c$ al marco $alfa - beta - gama$ [O'Rourke, 2019] en donde las cantidades del sistema trifásico son proyectadas en los ejes alfa-beta siendo el tercer eje un complemento para representarse en un espacio tridimensional, esta transformación se obtiene realizando la multiplicación matricial de los vectores instantáneos por la matriz presentada en la Ecuación 3 [Verucchi, 2007].

$$\begin{pmatrix} F_\alpha & F_\beta & F_\gamma \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_a & F_b & F_c \end{pmatrix} \quad (3)$$

Para el análisis de las tres corrientes se ha utilizado el módulo del vector de espacio instantáneo (MISP), el cual se calcula por medio de la Ecuación 4.

$$MISP = \sqrt{F_\alpha^2 + F_\beta^2} \quad (4)$$

Transformada Discreta de Fourier (DFT)

Otra herramienta utilizada para la detección de fallas es la transformada discreta de Fourier (DFT por sus siglas en inglés), con ella es posible ver características importantes oscilantes de una señal, la DFT se define como se presenta en la Ecuación 5. Donde $X(k)$ es la secuencia en el dominio de la frecuencia y $x(n)$ la secuencia en el dominio del tiempo

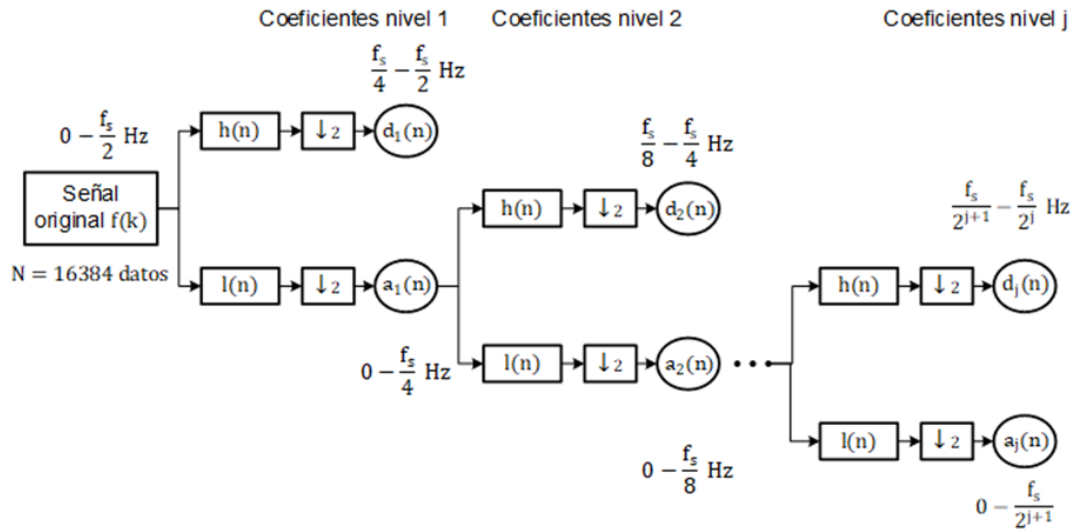
$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-\frac{j2\pi}{N}kn}, k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (5)$$

En la presente investigación se aplica el algoritmo eficiente para el cálculo de la DFT conocido como la FFT base 2, el tamaño de las muestras N está en función de la base del algoritmo. La cantidad de operaciones requeridas para obtener la DFT es de N^2 multiplicaciones complejas y de $N^2 - N$ sumas complejas, en cambio con el algoritmo FFT se requieren $\left(\frac{N}{2}\right)N$ multiplicaciones complejas y $N \log_2 N$ sumas reduciendo así la velocidad computacional en su cálculo [Proakis, 2007]. Debido a que al aplicarse la FFT a una señal en el dominio del tiempo, se obtiene el comportamiento de la señal en el dominio de la frecuencia, se facilita analizar el comportamiento de la frecuencia de firma de falla del motor BLDC.

Análisis ondeleta discreta multi-resolución (MRA)

Una segunda técnica utilizada para efectuar el diagnóstico de fallas eléctricas del estator del motor BLDC es el análisis del módulo del ISP aplicando para ello una descomposición en bandas de frecuencia. Esto se logra mediante la transformada discreta ondeleta con el análisis multi-resolución, cuyo proceso se muestra en la Figura 4, con esto es posible descomponer una señal en el dominio del tiempo en diferentes componentes de escala y tendencia, cada descomposición corresponde a un nivel que representa una parte de la señal original que ocurre en un momento particular y en una banda de frecuencia, las cuales están separadas logarítmicamente en base 2 lo que hace que la señal descompuesta tenga la propiedad de localización en tiempo-frecuencia, lo que permite analizar el comportamiento de la banda de frecuencia en donde se encuentra la información de la falla de espiras del motor BLDC. Para ver el comportamiento de cada nivel del análisis multi-resolución se calcula, el valor cuadrático medio (RMS por sus siglas en inglés) de las muestras discretas de los coeficientes de detalle de cada banda de frecuencia obtenida, Ecuación 6 [Walker, 2008], este valor es utilizado como indicador de falla. Donde $d_1, d_2, \dots, d_n$ son los coeficientes de detalle del análisis multiresolución y N_m número de muestras del nivel de descomposición

$$RMS = \sqrt{\frac{(d_1)^2 + (d_2)^2 + \dots + (d_n)^2}{N_m}} \quad (6)$$



Fuente: elaboración propia

Figura 4 Descomposición multinivel ondeleta MRA.

Ondeleta Haar nivel 1

Para llevar a cabo el proceso del análisis multi-resolución es necesaria una ondeleta madre, la más simple de todas es la ondeleta Haar de nivel 1, la cual utiliza un par de coeficientes que al hacer la convolución con la señal original la descompone, obteniéndose así los coeficientes de aproximación y de detalle por medio de la Ecuación 7 y Ecuación 8 respectivamente, donde A_m es el coeficiente de aproximación y D_m el coeficiente de detalle. Esta ondeleta a pesar de ser la más simple ha demostrado un gran desempeño en la detección de fallas eléctricas en el campo de las máquinas eléctricas.

$$A_m = \frac{f_{2n-1} + f_{2n}}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

$$D_m = \frac{f_{2n-1} - f_{2n}}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

Ondeleta Daubechies nivel 4

Otra ondeleta madre explorada en la investigación es la Daubechies 4, la cual utiliza cuatro coeficientes y es más elaborada que la ondeleta Haar nivel 1, esta se

define de maneja similar, la diferencia está en los coeficientes que la componen, de tal manera que para encontrar los coeficientes de aproximación y de detalle es necesario aplicar el producto escalar como se muestra en la Ecuación 9 y la Ecuación 10 respectivamente, donde V_m^1 es la señal escalada y W_m^1 la función ondeleta

$$A_m = f \cdot V_m^1 \quad (9)$$

$$D_m = f \cdot W_m^1 \quad (10)$$

La señal escalada se compone por cuatro coeficientes significativos, Ecuación 11. Utilizando estos coeficientes, las señales de escalado V_m^1 se definen para realizar la convolución con la señal original.

$$\alpha_1 = \frac{1 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \alpha_2 = \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \alpha_3 = \frac{3 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \alpha_4 = \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad (11)$$

Por otro lado, los coeficientes de detalle de la función ondeleta, se definen como se muestra en la Ecuación 12.

$$\beta_1 = \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \beta_2 = \frac{\sqrt{3} - 3}{4\sqrt{2}}, \beta_3 = \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \beta_4 = \frac{-1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad (12)$$

De igual manera, utilizando los coeficientes de la Ecuación 12, se obtienen las funciones ondeleta W_m^1 que al realizar la convolución con la función original se obtienen el detalle de la señal [Walker, 2008].

Aislamiento de las fallas, análisis de las 3 sigmas

Para validar la capacidad de las herramientas de análisis estudiadas, se procedió a implementar un análisis de tipo estadístico llamado análisis de las 3 sigmas. La distribución de probabilidad normal sirve para hacer el análisis estadístico de las 3 sigmas, para calcular una distribución normal de una población, son necesarios parámetros estadísticos como la media y la desviación estándar, la función de distribución viene dada por la Ecuación 13, σ es la desviación estándar y μ la media aritmética

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad -\infty < x < \infty \quad (13)$$

Algunas características de la función de probabilidad son que la media la ubica al centro de la gráfica y como el área siempre es la unidad, la gráfica disminuirá su altura o aumentará en proporción inversa a la desviación estándar [Mendenhall, 2010].

3. Resultados

Descripción de los escenarios de falla

Se presentan los resultados experimentales de los diferentes escenarios y esquemas de diagnóstico de falla abordados en la presente investigación. Se exploraron varias herramientas tiempo frecuencia para efectuar el diagnóstico de fallas eléctricas del estator en el motor BLDC de vehículo eléctrico ligero, con cuatro escenarios de falla propuestos en la fase A del estator: caso sano, falla estator 13.8% y 21.2% en corto circuito y falla estator 29.8% en corto circuito. En la Tabla 1 se ilustran los parámetros de dicha máquina. Por otro lado, el detalle de la magnitud de la inductancia que fue alterada, así como el porcentaje de cortocircuito en el devanado de la fase A del motor BLDC, se muestra en la Tabla 2.

Tabla 1 Parámetros de operación del motor BLDC.

Parámetro	Cantidad
Velocidad del motor	215 RPM
Frecuencia de muestreo	11000 Hz
Total de datos	16384
Número de experimentos por escenario	30
Frecuencia fundamental de la corriente	140 Hz
Frecuencia de firma de falla	280 Hz

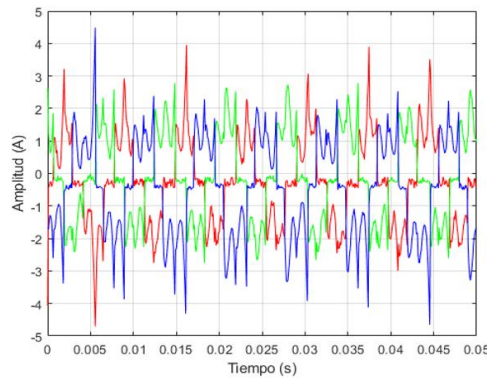
Fuente: elaboración propia

Tabla 2 Caracterización de las fallas inducidas.

Condición	Inductancia (mH)	Proporción de la falla (%)
Sano	0.265	0
Falla 1	0.2285	13.77
Falla 2	0.2087	21.24
Falla 3	0.1859	29.84

Fuente: elaboración propia

Como referencia, la Figura 5 se muestran las corrientes del estator del motor BLDC para el caso sano, en ellas se muestra el patrón de conmutación de tipo trapezoidal.



Fuente: elaboración propia

Figura 5 Corrientes del motor BLDC sin falla.

Análisis espectral del módulo del ISP

El primer análisis efectuado, es el análisis espectral del módulo del ISP, este se obtiene mediante el análisis con la transformada discreta de Fourier en su versión rápida. El motor BLDC es impulsado mediante la aplicación de un patrón de conmutación de pulsos trapezoidal, que a pesar de contar con sensores de efecto Hall dispuestos en la máquina para efectuar una orientación del campo magnético en la misma, no se cuenta con ninguna estrategia de control o seguimiento de velocidad en lazo cerrado por parte del procesador de señales digitales que efectúa el control de la máquina. Esta condición provoca fluctuaciones en la velocidad que se manifiestan en los espectros de firma de falla, en la Figura 6a se aprecian estas fluctuaciones, así como un total de 30 espectros de frecuencia para el escenario del caso sano. En la Figura 6b se presentan los espectros para el caso con la falla 3, en ella se puede apreciar un desplazamiento de la firma de falla a causa de una disminución de velocidad provocada por la falla inducida.

Análisis MRA con la TDO (transformada discreta ondeleta)

Otra de las herramientas utilizadas para efectuar el diagnóstico de fallas es la transformada discreta ondeleta (TDO). Esta herramienta permite evaluar el nivel de daño o degradación del devanado al cuantificar el nivel efectivo de los coeficientes por banda de frecuencia, resultado de la descomposición multinivel. La descomposición MRA realizada a las señales de los experimentos logró un total de 14 niveles de descomposición con base en la cantidad de 16384 datos adquiridos

de forma discreta, siendo la quinta banda la que contiene información del ancho de banda de 171.1 a 343.7 Hz , por lo que es posible analizar el comportamiento de la frecuencia de falla estimada de 258 Hz .

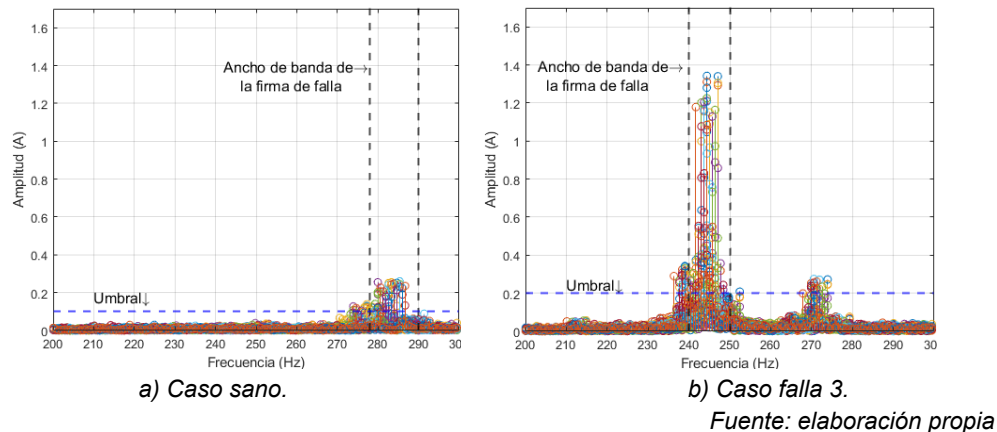


Figura 6 Espectro del MISP de 30 experimentos.

Transformada discreta ondeleta de Haar nivel 1

La primera ondeleta madre utilizada y la más sencilla de ellas, es la transformada discreta ondeleta de Haar de nivel 1. Dicha ondeleta madre se aplicó en la descomposición multinivel (MRA) antes mencionada. El nivel efectivo (RMS) de los coeficientes de detalle de los 30 experimentos efectuados se utiliza como indicador de firma de falla. En la Tabla 3 se muestran los valores efectivos de las 14 bandas de frecuencia, la quinta banda, la cual se enfatiza, que es la que contiene información de la falla en el estator tiene magnitud para el escenario sin falla de 1.487 *unidades* y para las fallas 1, 2 y 3 de 1.909, 2.841 y 4.332 *unidades* respectivamente.

Transformada discreta ondeleta Daubechies nivel 4

A manera redundante del análisis multi-resolución, fue utilizada la ondeleta Daubechies 4, la Tabla 4 muestra el valor RMS de las 14 bandas de frecuencia, en donde la banda de firma de falla, la cual se enfatiza, tiene una magnitud para el caso sano de 1.585 *unidades* y para la falla 1, 2 y 3 de 2.13 *unidades*, 3.238 *unidades* y 5.015 *unidades* respectivamente.

Tabla 3 Nivel RMS de los coeficientes de la TDO para la ondeleta madre Haar.

Banda	Rango (Hz)	Caso sano	Falla 1	Falla 2	Falla 3
1	2750 – 5500	0.3427	0.357	0.4058	0.4971
2	1375 – 2750	0.6868	0.6588	0.659	0.7668
3	687.5 – 1375	1.3792	1.2949	1.2115	1.346
4	343.75 – 687.5	1.5183	1.6104	1.9271	2.2591
5	171.87 – 343.75	1.4872	1.9089	2.8397	4.3335
6	85.93 – 171.87	1.1125	1.0714	1.3975	2.5803
7	42.96 – 85.93	0.7907	1.0424	1.7196	2.5745
8	21.48 – 42.96	0.7842	0.9332	0.8489	1.0496
9	10.74 – 21.48	0.6989	0.6886	0.9817	1.6602
10	5.37 – 10.74	0.7452	0.6867	1.8229	3.033
11	2.68 – 5.37	0.6897	0.6808	2.2315	3.9767
12	1.34 – 2.68	0.3782	0.4299	0.4097	0.6626
13	0.67 – 1.34	0.3453	0.3699	0.3932	0.7662
14	0.33 – 0.67	0.375	0.4621	0.4945	1.0176

Fuente: elaboración propia

Tabla 4 Nivel RMS de los coeficientes de la TDO para la ondeleta Daubechies 4.

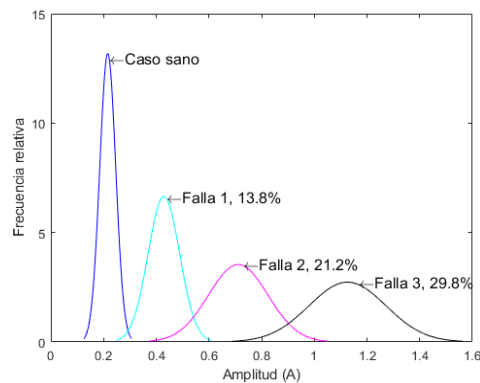
Banda	Rango (Hz)	Caso sano	Falla 1	Falla 2	Falla 3
1	2750 – 5500	0.2685	0.3013	0.3626	0.4556
2	1375 – 2750	0.5731	0.5584	0.5688	0.6793
3	687.5 – 1375	1.5324	1.387	1.2024	1.1736
4	343.75 – 687.5	1.5104	1.6096	1.9044	2.4205
5	171.87 – 343.75	1.5849	2.1303	3.238	5.0154
6	85.93 – 171.87	1.0152	0.9296	1.1431	2.1968
7	42.96 – 85.93	0.6857	0.7702	1.1579	1.8525
8	21.48 – 42.96	0.6888	0.7756	0.7486	0.8168
9	10.74 – 21.48	0.575	0.5951	0.8243	1.1042
10	5.37 – 10.74	0.7232	0.6526	1.9437	2.8944
11	2.68 – 5.37	0.7025	0.5781	2.3602	4.2001
12	1.34 – 2.68	0.3252	0.3395	0.4907	0.7068
13	0.67 – 1.34	0.3364	0.3558	0.5185	1.0002
14	0.33 – 0.67	0.3407	0.3373	0.6158	0.8847

Fuente: elaboración propia

Análisis de las 3 sigmas

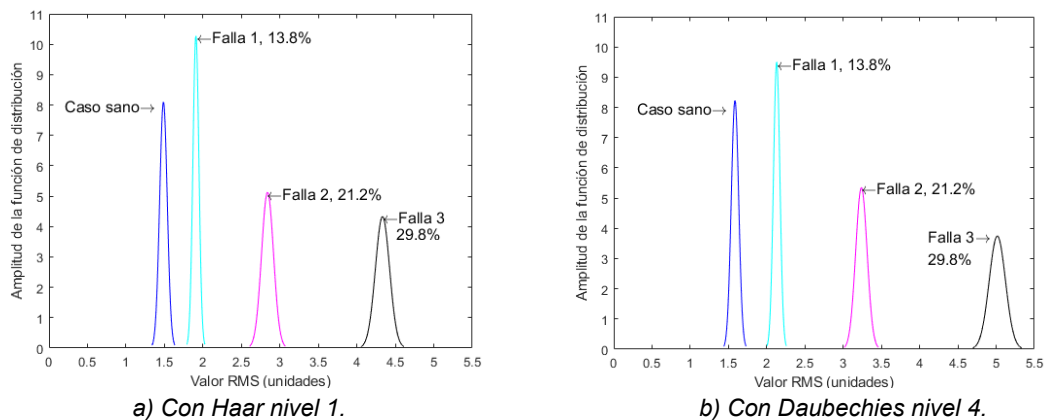
Para validar la capacidad de las herramientas de análisis para efectuar la detección y el aislamiento de los diferentes escenarios de falla, se utilizó el análisis estadístico de las 3 sigmas, este permite ver la distribución de un conjunto de experimentos en un rango de ± 3 variaciones estándar respecto a la media de los datos analizados, observándose así diferencias entre conjuntos de experimentos. En primer lugar, se realizó el análisis de las 3 sigmas a las amplitudes de la banda de frecuencia de firma de falla obtenida del análisis espectral del módulo del ISP, cada experimento consta de 16384 datos a una frecuencia de muestreo de 11 kHz, los resultados se muestran en la Figura 7, se observa una media de los

experimentos del caso sano de 0.216 A, mientras que para los casos de las fallas 1, 2 y 3 de 0.429, 0.711 y 1.127 A respectivamente. Así mismo se realiza el análisis de las 3 sigmas a los 30 experimentos efectuados para cada uno de los escenarios para el MRA con la ondeleta Haar de nivel 1, se tomó el valor RMS de la quinta banda de frecuencia para construir las funciones de densidad de probabilidad. Dichas funciones se pueden observar en la Figura 8a.



Fuente: elaboración propia

Figura 7 Distribución de probabilidad del espectro de frecuencia de las corrientes.



Fuente: elaboración propia

Figura 8 Distribución de probabilidad de los coeficientes de la TDO.

De manera similar, el análisis estadístico de las 3 sigmas fue aplicado al análisis MRA con la ondeleta madre Daubechies nivel 4 tomando el valor RMS de la quinta banda de frecuencia, la Figura 8b muestra los resultados, en la que también se puede observar una diferencia importante entre los casos con falla y el caso sano, demostrándose así que es posible la detección de la falla con esta ondeleta.

4. Discusión

La presente investigación muestra los resultados de la detección de fallas mediante técnicas de tipo no invasivas, las cuales se basan en la adquisición de señales de corrientes del estator del motor BLDC de vehículo eléctrico ligero. La detección de fallas de diferentes niveles de corto circuito en los devanados del estator es posible mediante el análisis espectral y el uso del módulo del fasor espacial instantáneo de Park o ISP. De manera redundante, el uso de la descomposición ondeleta multinivel permite establecer una banda de frecuencia en la cual, el nivel efectivo de los coeficientes ondeleta cambia en función de la magnitud del nivel de daño en los devanados. Finalmente, para evaluar la capacidad de aislamiento de falla de las herramientas estudiadas se implementó el análisis estadístico de las tres sigmas, el cual permite verificar el aislamiento y/o el traslape de la distribución Gaussiana para cada escenario de falla.

5. Conclusiones

La presente investigación permite concluir que es posible llevar a cabo el uso del módulo del ISP aplicándolo a señales de corriente de tipo trapezoidal de un motor BLDC de vehículo eléctrico ligero. Esta afirmación, es válida tomando en cuenta que las corrientes del estator del motor son resultado de la suma de corrientes senoidales de diferentes frecuencias. Además, se probaron básicamente dos tipos de herramientas de procesamiento de señales, como lo es la transformada discreta de Fourier y la transformada discreta ondeleta, en la cual se utilizaron dos ondeletas madre Haar nivel 1 y Daubechies nivel 4. Finalmente, se validó la capacidad de las herramientas de aislar los diferentes escenarios de falla mediante el uso de la herramienta estadística de distribución de probabilidad Gaussiana conocida como tres sigmas. Cabe mencionar que las herramientas de análisis reportadas pueden ser validadas en tiempo real, o bien, en línea y con un carácter de tipo no invasivo, lo cual se logra adquiriendo corrientes del estator del motor BLDC de vehículo eléctrico ligero mediante el uso de sensores de efecto Hall. Las técnicas de diagnóstico expuestas en la investigación pueden ser utilizadas en un futuro para la detección de otro tipo de fallas como son las fallas mecánicas.

6. Referencias y Bibliografía

- [1] Ali H. J., Shary D. K., & Abbood H. D., (2024). A review of intelligent techniques based speed control of brushless dc motor (bldc). *Basrah Journal for Engineering Sciences*, Vol. 24, No. 1, pp. 109-119, February 2024, ISSN 2311-8385, <https://doi.org/10.33971/bjes.24.1.12>.
- [2] Du M. N., & Zhu D., (2023). Fault diagnosis of brushless dc motor based on stack sparse autoencoder. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2674, No. 1 pp. 012033. ISSN 1742-6596, doi: 10.1088/1742-6596/2674/1/012033.
- [3] IEEE Power Engineering Society, (2004). *IEEE Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Electric Machines*, ISBN: 0-7381-3980-7 SS95212.
- [4] Jafari A., Faiz J., & Jarrahi M. A., (2020). A simple and efficient current-based method for interturn fault detection in BLDC motors. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 17, No 4, p. 2707-2715, 2020, ISSN 1941-0050, doi: 10.1109/TII.2020.3009867.
- [5] Korkosz M., Pakla B., & Prokop J., (2021). Frequency analysis of partial short-circuit fault in bldc motors with combined star-delta winding. *Energies*, Vol. 15, No.1, pp. 196, ISSN 1996-1073, <https://doi.org/10.3390/en15010196>.
- [6] Mendenhall W., Beaver R. J., & Beaver B. M., (2010). *Introducción a la probabilidad y estadística*, 13 ed, Cengage Learning, ISBN:978-607-481-466-8.
- [7] Mondragón M. R., & López R. O., (2024). Motores BLDC en aplicaciones automotrices. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, Vol. 12, No. Especial, pp. 1-8, ISSN 2007-6363, <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial.12146>.
- [8] Morel C., Gueux B. L., Rivero S., & Chahba S., (2023). Currents analysis of a brushless motor with inverter faults-Part II: Diagnostic method for open-circuit fault isolation. *Actuators MDPI*, Vol. 12, No. 6, pp. 230, ISSN 2076-0825, <https://doi.org/10.3390/act12060230>.
- [9] O'Rourke C. J., Qasim M., Overlin M. R., & Kirtley J. L., (2019). A geometric interpretation of reference frames and transformations: dq0, clarke, and park.

- IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 34, No. 4, pp. 2070-2083, 2019, ISSN 1558-0059, doi: 10.1109/TEC.2019.2941175.
- [10] Park J. K., & Hur J., (2015). Detection of inter-turn and dynamic eccentricity faults using stator current frequency pattern in IPM-type BLDC motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 63, No. 3, pp. 1771-1780, ISSN 1557-9948, doi: 10.1109/TIE.2015.2499162.
- [11] Park J. K., Jeong C. L., Lee S. T., & Hur J., (2014). Early detection technique for stator winding inter-turn fault in BLDC motor using Input impedance. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 51, No. 1, pp. 240-247, ISBN: 978-1-4799-0336-8, doi: 10.1109/ECCE.2013.6647296.
- [12] Pérez P., Solís R., & Torres L., (2023). Review of methods for diagnosing faults in the stators of bldc motors. Processes, Vol. 11 No.82 pp. 525, ISSN 2227-9717, doi: 10.3390/pr11010082.
- [13] Proakis J., & Manolakis D. Tratamiento Digital De Señales, Pearson Education, ISBN: 978-84-8322-347-5, 2007.
- [14] Shifat T. A., & Hur J. W., (2020). An effective stator fault diagnosis framework of BLDC motor based on vibration and current signals. IEEE Access, Vol. 8, pp. 106968–106981, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3000856.
- [15] Susilo D. D., Ubaidillah U., & Prabowo A. R., (2024). Stator fault diagnosis of bldc motor at varying speed operation using least square support vector machine, Diagnostyka, Vol. 25, No. 3, doi: 10.29354/diag/191426.
- [16] Usman A., Doiphode N. T., & Rajpurohit B. S., (2019). Finite element modeling of stator winding faults in permanent magnet synchronous motor: Part II. 2019 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE). IEEE, pp. 169-176, doi: 10.1109/EDPE.2019.8883937.
- [17] Verucchi C. J., & Acosta G. G. Técnicas de detección y diagnóstico de fallos en máquinas eléctricas de inducción. IEEE Latin America, Vol. 5, No. 1, 2007.
- [18] Walker J. S. A Primer on Wavelets and their scientific applications. Taylor & Francis Group, ISBN 978-1-58488-745-4, 2008.