

# DIAGNÓSTICO DE FALLA ELÉCTRICA DE ESTATOR EN MOTORES BLDC DE VEHÍCULO LIGERO EN DIFERENTES REGÍMENES DE VELOCIDAD MEDIANTE LA TRANSFORMA DISCRETA DE FOURIER

*STATOR'S ELECTRIC FAULT DIAGNOSIS IN BLDC MOTORS OF LIGHT VEHICLE IN DIFFERENT VELOCITY REGIMES BY MEANS OF THE DISCRET FOURIER'S TRANSFORM*

**Rodolfo Jáuregui Acevedo**

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México  
*rjauregui30.rj@gmail.com*

**Francisco Javier Villalobos Piña**

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México  
*fvillalobos@mail.ita.mx*

**Ricardo Álvarez Salas**

Universidad Autónoma de San Luís Potosí, México  
*ricardo.alvarez.salas@gmail.com*

**Carlos Humberto Saucedo Zárate**

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

**Recepción:** 30/abril/2020

**Aceptación:** / /2020

## Resumen

El presente trabajo muestra un esquema de diagnóstico de fallas eléctricas del estator en diferentes regímenes de velocidad y par constante en motores tipo BLDC de vehículos eléctricos ligeros mediante el análisis de tres escenarios diferentes de velocidad con una falla en el devanado del estator de la fase C. Para efectuar el diagnóstico de la falla se adquiere información eléctrica de las corrientes del estator y mediante el uso del fasor de espacio instantáneo de Park (ISP, por sus siglas en inglés) se analiza el módulo de dicho fasor mediante la técnica tiempo-frecuencia conocida como transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés), lo cual permite identificar la firma de fallas eléctrica del estator en función de su velocidad para cada uno de los escenarios de velocidad estudiados.

**Palabras Clave:** Diagnóstico de falla, fasor de espacio instantáneo, motor BLDC, transformada rápida de Fourier.

## **Abstract**

*In this work a scheme of stator's electric fault diagnosis is showed in different velocity regimes and constant torque in motors type BLDC of electric light vehicles by means of three different stages velocity analysis with a stator's winding fault on phase C. To be made fault diagnosis the stator's electrical currents information is acquired and by to use the instantaneous space phasor (ISP), the modulus of its phasor is analyzed through the time-frequency technique known as fast Fourier transform, thus allows identity the stator's signature fault in function of its velocity for each of one velocity-schemes studied.*

**Keywords:** *BLDC motor, fast Fourier transform, fault diagnosis, instantaneous space phasor.*

## **1. Introducción**

Los motores eléctricos de corriente directa sin escobillas (BLDC, por sus siglas en inglés) han sido ampliamente utilizados en varios sectores de la industria como es la automotriz, aeroespacial, robótica y generación de energía eléctrica, por mencionar algunos; ya que los motores BLDC cuentan con varias características que los hacen atractivos como lo son alta eficiencia, par de arranque instantáneo, nulo mantenimiento y favorecen el medio ambiente al no generar ningún tipo de emisión contaminante.

Para el estudio de este tipo de motores eléctricos es necesaria la construcción de bancos de pruebas que permitan efectuar el análisis y/o diseño de sistemas con motores del tipo BLDC [Racewicz, 2018], además efectuar la validación de resultados mediante pruebas experimentales. El monitoreo y diagnóstico de fallas en los motores BLDC pueden ser del tipo mecánico [Gritli, 2017], pero también pueden ser problemas de tipo eléctrico [Faiz, 2018]. Para el diagnóstico de fallas eléctricas del estator existen varios tipos de enfoques, uno de ellos ampliamente utilizado es la identificación paramétrica [Bulgakov, 2017], [Prakash, 2017], [Huang,

2019], un enfoque ampliamente utilizado es el análisis de firmas de fallas eléctricas del estator [Hosseini,2019], [Izadi, 2017], [Lee, 2017], [Imoru, 2017] llamado MCSA (por sus siglas en inglés). Existen otros enfoques para efectuar el análisis de fallas en motores tipo BLDC de vehículos eléctricos [Mitronikas, 2017], [Papathanasopoulos,2017], [Zhang, 2018], [Liu, 2016], [Xue, 2019] en los cuales se efectúa la detección de la falla a través del análisis de sensores instalados en las propias máquinas y se encuentran los algoritmos de control y diagnóstico embebidos los cuales representan un gran costo computacional.

La aportación del presente trabajo se enfoca al diagnóstico de fallas en el estudio del motor BLDC a diferentes regímenes de velocidad al aplicar par constante con falla inducida en el devanado de la fase C. Aplicando la técnica de tiempo-frecuencia conocida como la transformada rápida de Fourier se obtiene la firma de falla en cada escenario de velocidad aplicado.

## **2. Métodos**

### **Esquema de diagnóstico**

El esquema de diagnóstico de fallas eléctricas del estator en el motor BLDC consiste en una técnica de tipo no invasiva, en la cual, se adquiere información eléctrica del estator mediante el uso de sensores de efecto hall. El motor BLDC que se usa como caso de estudio, opera con un patrón de corrientes de tipo trapezoidal resultante de aplicar un patrón de voltajes en el estator del mismo tipo, dicho patrón no es una señal senoidal pura como se requiere para poder utilizar el fasor de Park ISP. Para solventar dicho problema se filtran las señales de corriente del estator y posteriormente poder obtener el módulo del ISP y aplicar el análisis tiempo-frecuencia basado en la transformada discreta de Fourier y lograr así la detección de las firmas de falla de estator asociadas a cierta frecuencia en particular en función de la velocidad de la máquina.

### **Filtro de Respuesta Finita al impulso**

Al obtener las señales de corriente del estator, se utiliza un filtro de tipo digital pasa bajas tipo Butterworth de respuesta finita al impulso (FIR sus siglas en inglés).

El algoritmo del filtro FIR es una suma ponderada de un cierto número de muestras digitales previas multiplicadas por sus coeficientes de filtrado [Angulo, 2006], se describe mediante la ecuación en diferencias o su equivalente en función de transferencia en la ecuación 1 y 2.

$$y_n = \sum_0^k b_k \cdot x(n - k) \quad (1)$$

$$H(z) = \sum_{k=0}^{M-1} b_k \cdot z^{-k} \quad (2)$$

Donde:

$y_n$ : señal de salida del momento ( $n$ ).

$x_n, x_{(n-1)}, \dots$ , son las muestras codificadas y retardadas hasta ( $n - k$ ).

$b_k$ : coeficientes de filtrado para cada muestra.

### Transformada rápida de Fourier

La transformada discreta de Fourier (DFT, por sus siglas en inglés) es una forma de mapear en tiempo información no periódica al dominio de la frecuencia continua. Cuando los datos son discretos en el tiempo (asumiendo que son periódicos en el tiempo), se utiliza la DFT para obtener una frecuencia discreta, asumiendo una representación periódica de los datos, expresada como se ilustra en la ecuación 3.

$$Y[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \left[ \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - j \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right] \quad (3)$$

La FFT se utiliza para la detección de falla en su versión diezmada en tiempo, la cual es una versión de algoritmo rápido para implementar la DFT, el cual genera los mismos resultados que la DFT, pero de forma más eficiente [Weeks, 2007]. El esquema implementado del presente trabajo se ilustra en figura 1.

### 3. Resultados

Para validar el algoritmo de detección de falla eléctrica de estator, se induce corto circuito en la fase C del estator del motor BLDC correspondiente al 9.243% del devanado de dicha fase, operando el motor con par constante.

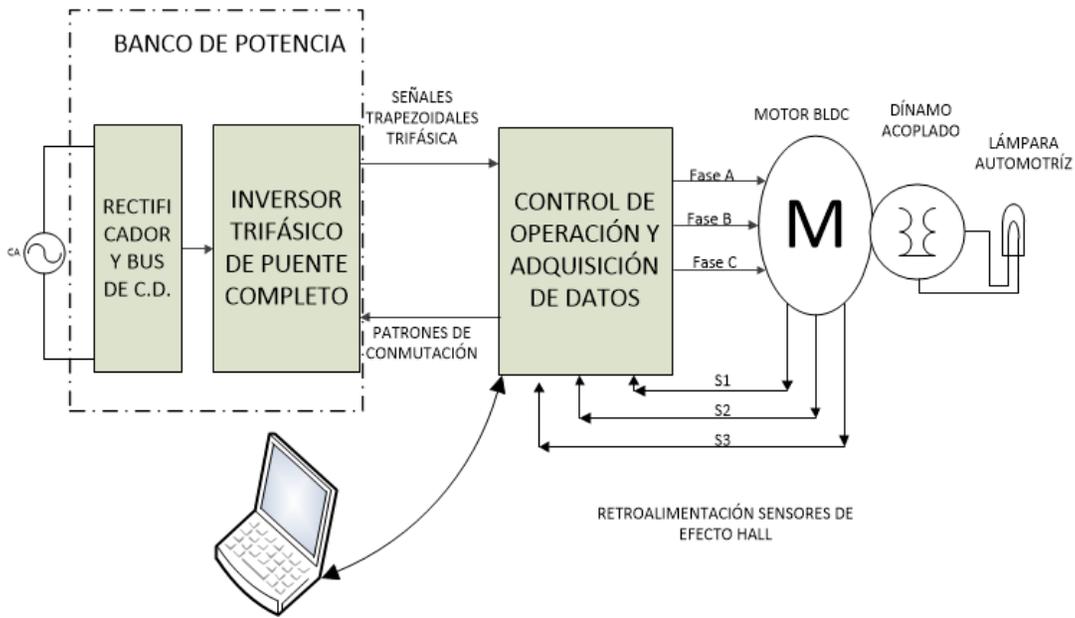


Figura 1 Esquema de banco de pruebas.

Se efectuó la adquisición de señales de corrientes del estator de tipo trapezoidales, considerando tres escenarios de velocidad en el motor, siendo estos 24, 160 y 125 rpm, respectivamente. Debido a que las señales de alimentación en los tres escenarios considerados son semejantes (trapezoidales), por simplicidad solo se presentan los resultados experimentales de velocidad a 160 rpm, mostrando los casos del motor sano y con falla, como se ilustra en figuras 2 y 3.

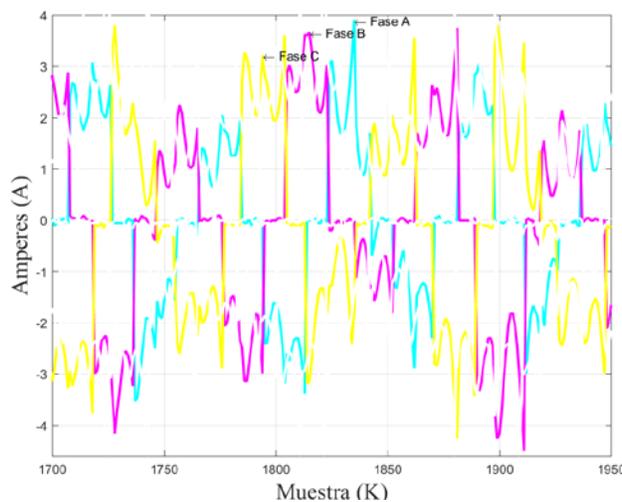


Figura 2 Señales de corrientes de alimentación de motor BLDC sano.

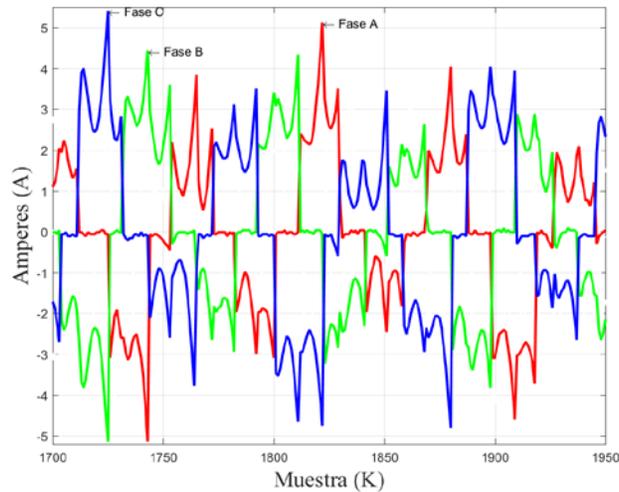


Figura 3 Señales de corriente de alimentación de motor BLDC con falla.

Las señales adquiridas de las corrientes del estator del motor BLDC no presentan un patrón tipo sinusoidal, dichas señales son procesadas al aplicar el filtro digital pasa bajas Butterworth tipo FIR orden 20 pasa bajas con frecuencia de muestreo de 2 kHz. El filtro digital es aplicado en caso sano y con falla, figuras 4 y 5.

Como se observa en figuras 4 y 5, las señales de corriente del estator del motor BLDC al ser filtradas son semejantes a señales del tipo sinusoidal, por lo que se parte de la hipótesis en la cual es posible utilizar el módulo ISP obteniendo el mapeo a un marco de referencia fijo conocido como transformada de concordia  $\alpha - \beta$ .

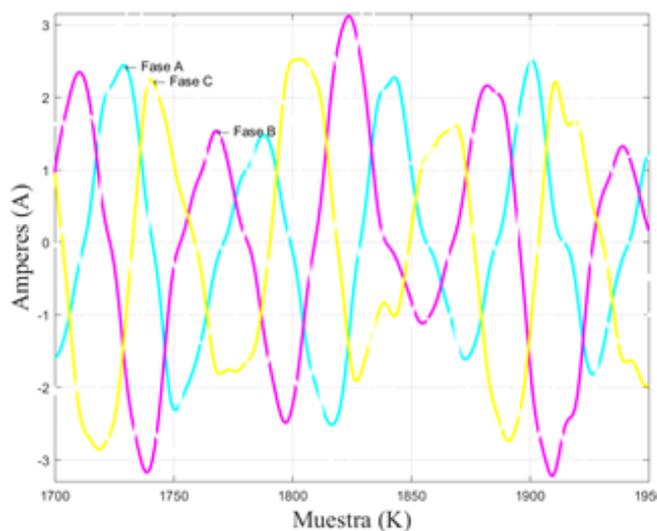


Figura 4 Señales de corrientes de alimentación filtradas de motor BLDC sano.

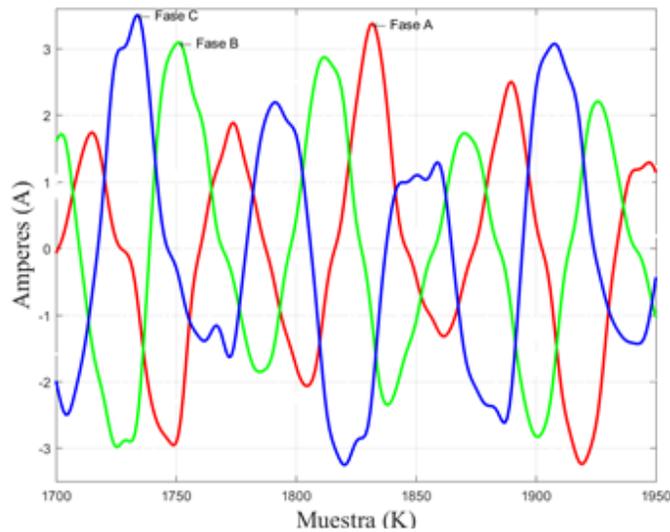


Figura 5 Señales de corriente de alimentación filtradas de motor BLDC con falla.

En trabajos ya reportados se muestra que la firma de falla eléctrica del estator  $f_{est}$  mediante el análisis del módulo ISP (ecuación 4), se presenta en una frecuencia igual a múltiplos del doble de la frecuencia fundamental  $f_{fun}$  (ecuación 5).

$$f_{est} = 2nf_{fun} \quad (4)$$

$$n = 1, 2, \dots \quad (5)$$

Para el presente trabajo y por simplicidad se toma la frecuencia de firma de falla para  $n = 1$  cómo se muestra en la ecuación 6.

$$f_{est} = 2f_{fun} \quad (6)$$

El primer escenario estudiado la frecuencia de la corriente fundamental  $f_{fun} = 21.48 \text{ Hz}$  del módulo del ISP presenta un armónico de firma de falla  $f_{est} = 42.91 \text{ Hz}$  característica con incremento del 130% aproximadamente respecto al caso sano, en la figura 6 se ilustra el resultado comparativo experimental.

El segundo escenario estudiado la frecuencia de la corriente fundamental  $f_{fun} = 34.18 \text{ Hz}$  del módulo del ISP presenta un armónico de firma de falla  $f_{est} = 68.36 \text{ Hz}$  característica con incremento del 60% aproximadamente respecto al caso sano, en la figura 7 se ilustra el resultado comparativo experimental.

El tercer escenario estudiado la frecuencia de la corriente fundamental  $f_{fun} = 44.92 \text{ Hz}$  del módulo del ISP presenta un armónico de firma de falla  $f_{est} = 89.84 \text{ Hz}$

característica con incremento del 150% aproximadamente respecto al caso sano, en la figura 8 se ilustra el resultado comparativo experimental.

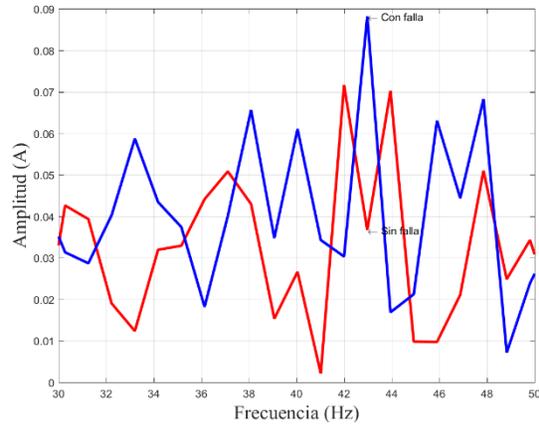


Figura 6 Detección de falla caso 125 rpm.

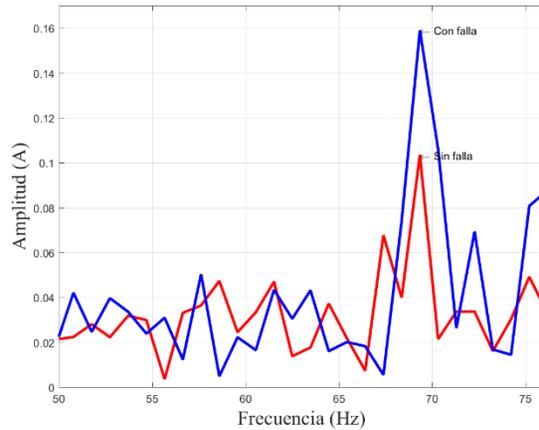


Figura 7 Detección de falla caso 160 rpm.

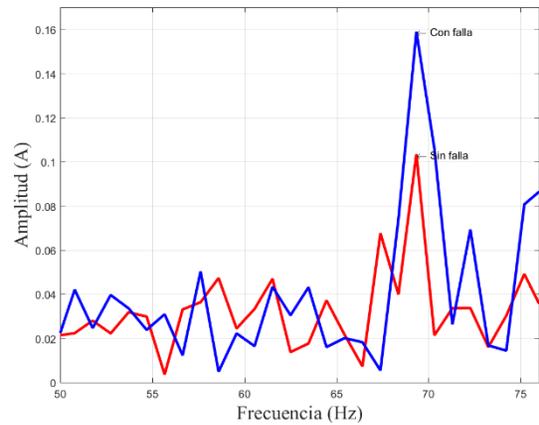


Figura 8 Detección de falla caso 240 rpm.

## **4. Discusión**

El filtrado de las señales de las corrientes del estator del tipo trapezoidal confirma por medio del filtro de orden 20, las señales se pueden tratar como señales senoidales y obtener el módulo del ISP. Analizando las señales del módulo del ISP con la técnica tiempo-frecuencia conocida como transformada discreta de Fourier en su versión rápida, se alcanza a detectar la firma de falla para cada uno de los escenarios de estudio de velocidad, donde el motor mantiene un par constante a una frecuencia del doble de la magnitud de la frecuencia fundamental de operación. La evidente detección de la firma de falla en la operación del motor BLDC en cada uno de los escenarios planteados donde se cortocircuitó un 9.243% del devanado de la fase C, comprueba la factibilidad del uso de la FFT en el diagnóstico de fallas.

## **5. Conclusiones**

La hipótesis considerada en la cual es posible efectuar el filtrado de señales eléctricas del estator de tipo trapezoidales provenientes del motor BLDC de vehículos eléctricos ligeros con un carácter no invasivo con fines de diagnóstico de fallas se comprueba como válida al lograr la detección de fallas en el régimen de velocidad y par de carga constante (tres casos diferentes estudiados y validados de forma experimental).

El uso de las herramientas ya reportadas para la detección de firmas de fallas eléctricas del estator aplicado a máquinas de inducción trifásica mediante el uso del módulo del fasor de Park (ISP por sus siglas en inglés) mapeando a un marco de referencia fijo de concordia  $\alpha - \beta$  es válida su aplicación para efectuar la detección de fallas eléctricas del estator en este caso la fase C del motor BLDC de vehículo eléctrico ligero.

Se comprueba además que la aplicación del filtro tipo FIR orden 20 pasa bajas Butterworth digital a una frecuencia de muestreo de 2 kHz no atenúa el efecto presentado por parte de las firmas de falla a frecuencias inferiores a la frecuencia de corte de 200 Hz gracias al alto grado de decadencia presentado por parte del filtro considerando que la magnitud de la falla inducida al devanado del estator del motor BLDC en la fase C es un porcentaje de 9.243% del devanado cortocircuitado.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Racewicz Szymon, Kazimierczuk Pawel, Kolator B Andrzej and Olszewski Andrzej, Use of 3 kw bldc motor for light two-wheeled electric vehicle construction, IOP Conferences Series: Material Science and Engineering, Vol. 421, pag. 042-067, 2018.
- [2] Y. Gritli, A. Bellini, C. Rossi, D. Casadei, F. Filipetti and G. Capolino, Condition monitoring of mechanical faults in induction machines from electrical signatures: review of different techniques, 2017 IEEE 11<sup>th</sup> International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Tinos, pag. 77-84, 2017.
- [3] J. Faiz and A. Jafari, Interturn fault diagnosis in brushless direct current motor- a review, 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Lyon, pag. 437-444, 2018.
- [4] A. Bulgakov and T. Kruglova, Intelligent method for fault finding of electric drive based on wavelet analysis of its electrical and mechanical parameters, International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017, Procedia Engineering, vol. 206, pag. 929-935, 2017.
- [5] S. Prakash and S. Sherine, Control of bldc motor powered electric vehicle using indirect vector control and sliding mode observer, International Journal of Pure and Applied Mathematics, vol 116, no.19, pag. 295-300, 2017.
- [6] Caixia Huang, Fei Lei, Xu Han and Zhiyong Zhang, Determination of modeling parameters for brushless dc motor that satisfies the power performance of an electric vehicle, Measurement and Control, vol 52, pag 765-774, 2019.
- [7] S.M. Hosseini, F. Hosseini and M. Abedi, Stator fault diagnosis of a bldc motor based on discrete wavelet analysis using ADAMS simulation, SN Applied Sciences, vol 1, no 1406, 2019.
- [8] S. Lee and J. Hur, Detection technique of stator inter-turn faults in bldc motors based on third-harmonic components of line currents, in IEEE Transactions on Industry Applications, vol 53, no 1, pag. 143-150, 2017.
- [9] V. Izadi, M. Abedi and H. Bolandi, Supervisory algorithm based on reaction wheel modeling and spectrum analysis for detection and classification of

- electromechanical faults, in *IET Science, Measurement & Technology*, vol 11, no 8, pag. 1085-1093, 2017.
- [10] OdunAyo Imoru, M. Arun Bhaskar, Adisa Abdul-Ganiyu Jimoh and Yskandar Hamam, Diagnosis of stator shorted-turn faults in induction machines using discret wavelet transform, *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, vol 9, no 3, pag. 349-355, 2017.
- [11] E. Mitronikas, D. Papathanasopoulos, G. Athanasiou and S. Tsotoulidis, Hall-effect sensor fault identification in brushless dc motor drives using wavelets, 2017 IEEE 11<sup>th</sup> International Symposium on Diagnostics for Electrica Machines Power Electronics and Drives (SDEMPED), Tinos, pag. 434-440, 2017.
- [12] D. Papathanasopoulos, G. Athanasiou, S. Tsotoulidis and E. Mitronikas, Fault identification on hall-effect sensors positioning in brushless dc motor drives via a fuzzy inference system, 2017 IEEE 11<sup>th</sup> International Symposium on Diagnostics for Electrica Machines Power Electronics and Drives (SDEMPED), Tinos, pag. 311-317, 2017.
- [13] D. Zhang, G. Liu, H. Zhou and W. Zhao, Adaptive sliding mode fault-tolerant coordination control for four-wheel independently driven electric vehicles, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol 65, no 11, pag.9090-9100, 2018.
- [14] Huan Liu and Hui Zhang, An improved dtc for in-wheel bldc motors in micro all-electric vehicles, *Automatika*, vol 57, no 3, pag. 648-659, 2016.
- [15] H. Xue, J. Zhou, M. Wang, Z. Li and H. Jiang, Using rotating speed monitoring for leakage fault diagnosis of in-wheel motor, *Journal of applied Science and Engineering*, vol 2, no 22, pag. 307-314, 2019.
- [16] J.M. Angulo-Usategui, B. García-Zapirain, I. Angulo-Martínez and J.V. Sáez, *Microcontroladores avanzados dspic controladores digitales de señales, arquitectura, programación y aplicaciones*, Thomson editores Spain, pag.32, 2006.
- [17] Michael Weeks, *Digital signals processing using matlab and wavelets*, Georgia State University, Infinite Sciencie press LCC, pag. 187-191, 2007.