# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA EL ANÁLISIS EN LÍNEA DE FALLAS EN EL ROTOR Y RODAMIENTOS DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO

Carlos Alberto Escobar Bergaño, Edwin Darío Teran Castro

caescobar@javerianacali.edu.co, edteran@javerianacali.edu.co

**Resumen:** Los procesos industriales dentro de las empresas son parte fundamental para realizar operaciones de forma continua y ordenada. Es necesario tener en constante monitoreo cada máquina mediante técnicas fiables. En este artículo se realizó el diseño, construcción e implementación de una tarjeta de adquisición de datos que utiliza las técnicas MCSA (Motor Current Signature Analysis), EPVA (Extended Park's Vector Approach) y ESA (Electric Power Spectral Analysis), para detectar fallas de barras rotas en rotor tipo jaula de ardilla y rodamientos, por medio del análisis en frecuencia del comportamiento del motor se muestran los resultados del estado de las barras de rotor y rodamientos en una pantalla LCD y por medio de un puerto Ethernet en una interfaz web.

## 1. Introducción

Los motores de inducción tipo jaula de ardilla son máquinas utilizadas en la industria, por la capacidad de transformar energía eléctrica en energía mecánica. Estos motores son alimentados por corriente alterna AC para su funcionamiento porque si un motor presenta una falla obliga a la empresa a tener un presupuesto aproximado del 30% del valor del motor para la reparación, en consecuencia, se hace necesario un sistema de monitoreo capaz de detectar oportunamente las fallas. [1], [2], [3], [5].

En este artículo se utilizó las técnicas MCSA (Motor Current Signature Analysis), EPVA (Extended Park's Vector Approach) y ESA (Electric Power Spectral Analysis) para la detección de fallas de barras rotas del rotor y rodamientos, Estas analizan a través del consumo de la corriente y voltaje en dominio de la frecuencia, dando el comportamiento del estado del motor. La experimentación fue realizada en motores 2 trifásicos de 220v a 60Hz uno en perfectas condiciones y el otro con falla de barras rotas y rodamientos.

## 2. Técnicas de Monitoreo

### 2.1 Extended park's vector approach – (EPVA)

Realiza una transformada de un sistema fasorial de componentes desfasadas 120º entre ellas a un sistema representado en el plano de coordenadas, permite referir las variables de una máquina trifásica a un sistema de dos ejes en cuadratura (D y Q).

$$\boldsymbol{i_D} = \sqrt{\frac{2}{3}\boldsymbol{i_A}} - \sqrt{\frac{1}{6}\boldsymbol{i_B}} - \sqrt{\frac{1}{6}\boldsymbol{i_C}} \qquad (1)$$

$$\boldsymbol{i_Q} = \sqrt{\frac{1}{2}\boldsymbol{i_B}} - \sqrt{\frac{1}{2}\boldsymbol{i_C}} \qquad (2)$$

Donde $\boldsymbol{i_A}$, $\boldsymbol{i_B}$ e $\boldsymbol{i_C}$ son las corrientes de las fases A, B y C del estator [4] [6] [9] [10] [13].

### 2.2 Motor current signal analysis (MCSA)

Esta técnica examina detalladamente la corriente de estator en dominio de la frecuencia analizando la amplitud de armónicos en frecuencias específicas en motores, detectando así fallas que presentan los mismos. [17] [18]

### 2.3 Electric power spectral analysis – (ESA)

Se utiliza para análisis en dominio de la frecuencia, busca principalmente los espectros de la potencia trifásica instantánea, para obtener las fallas que un motor de inducción presente, por tal razón para su análisis en frecuencia se encuentra al doble de la frecuencia fundamental $f = 2f$.

$$\mathrm{p(t)} = \mathrm{v_a(t)i}_a\mathrm{(t)} + v_\mathrm{b}\mathrm{(t)i_b(t)} + v_\mathrm{c}\mathrm{(t)i_c(t)} \qquad (3)$$

Donde a,b,c son las fases de alimentación del motor de inducción [4] [7] [14] [15] [16].

## 3. Indicadores de fallas para análisis del motor de inducción

### 3.1 Indicador de falla barras rotas

La falla de barras rotas de rotor hace que se generen en análisis en frecuencia, dos frecuencias laterales alrededor de la frecuencia fundamental de alimentación, que en el caso de Colombia es 60Hz, estos armónicos se diagnostican en un valor mayor a -39 decibles (dB) para las tres técnicas mencionada.

### 3.2 Indicador de falla rodamientos

Las fallas de los rodamientos en los motores de inducción trifásicos, se pueden dar en diferentes partes del rodamiento, la pista interna o externa, en elementos rodantes o la jaula el valor mínimo necesario de magnitud en el punto de frecuencia para asociar una posible falla en rodamientos para MCSA es mayor o igual a 420, para ESA mayor o igual a 600000, para EPVA mayor igual a 610.

## 4. Frecuencias de falla

### 4.1 Falla de barras rotas

Para la búsqueda de falla en el rotor de barras rotas, se realiza un análisis espectral con la FFT, buscando la aparición de las frecuencias específicas asociadas a barras rotas. y se encuentra con la siguiente ecuación. [4] [11] [12] [13]:

$$\mathrm{f_{rotor}} = (1 \pm 2\mathrm{s})\mathrm{f_s} \qquad (4)$$

$f_\mathrm{s}$ Y $s$ son la frecuencia de suministro eléctrico y el deslizamiento del motor respectivamente.

### 4.2 Fallas en rodamientos

Para las fallas en rodamientos se analiza cada parte del rodamiento, pista externa, pista interna, elementos rodantes y Jaula, puede contener componentes espectrales en el comportamiento de las corrientes medidas del motor, cuyas frecuencias se pueden determinar por la siguiente ecuación. [8] [11] [12] [13]:

$$f_\mathrm{rodamientos} = |f_\mathrm{s} \pm \mathrm{k}f_\mathrm{n}| \qquad (5)$$

Donde $f_s$ es la frecuencia de alimentación del motor en Hz, $f_n$ es la frecuencia natural correspondiente a la parte del rodamiento y $k$= 1, 2,3… Para el parámetro $f_n$ corresponde a cada parte del rodamiento se calcula con las siguientes ecuaciones: [8] [11] [12].

$f_C$= Frecuencia de falla de la jaula.

$$f_C = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b \cos\beta}{D_c}\right) \qquad (6)$$

$f_O$ =Frecuencia de falla de la pista de rodadura externa.

$$f_O = \frac{N_B}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b \cos\beta}{D_c}\right) \qquad (7)$$

$f_I$= Frecuencia de falla de la pista interna.

$$f_I = \frac{N_B}{2} f_r \left(1 + \frac{D_b \cos\beta}{D_c}\right) \qquad (8)$$

$f_B$= Frecuencia de falla de los elementos rodantes.

$$f_B = \frac{D_c}{D_b} f_r \left[1 - \left(\frac{D_b \cos\beta}{D_c}\right)^2\right] \qquad (9)$$

Con:

$f_r$= Frecuencia del rotor.

$D_b$ = Diámetro de los elementos rodantes.

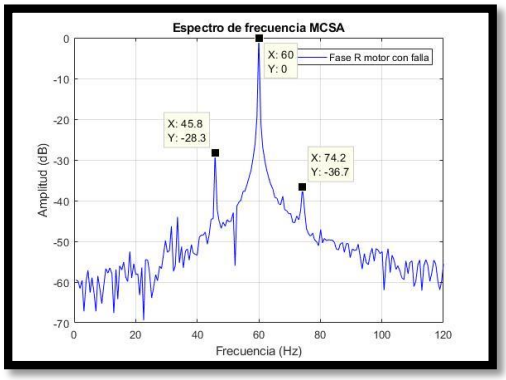
$D_c$= Diámetro de paso.

$N_B$=número de elementos rodantes.

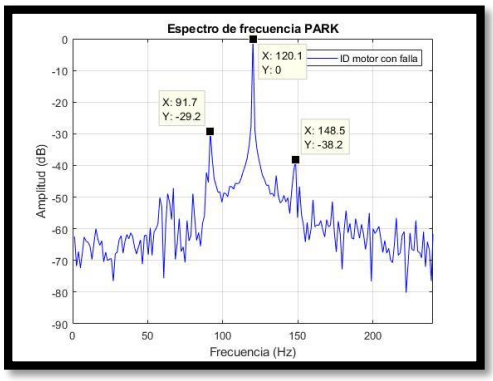
β = ángulo de contacto de elementos rodantes.

## 5. Resultados

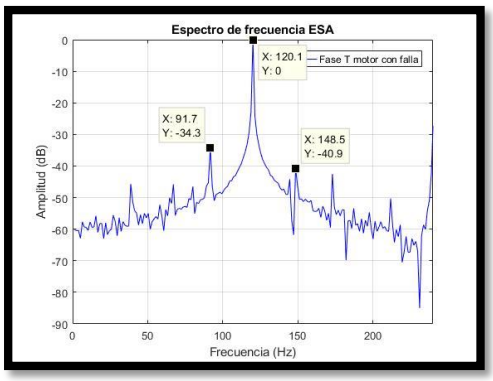
En las siguientes imágenes de las técnicas implementadas, se observa el comportamiento de las bandas laterales en el dominio de la frecuencia para el motor con falla en las barras rotas, donde se aprecia los niveles de amplitud en dB son los definidos en la técnica para la detección de la falla.




**Espectro de frecuencia técnica MCSA.**

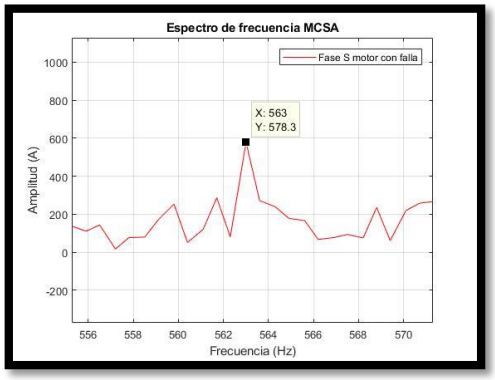



**Espectro de frecuencia técnica PARK.**

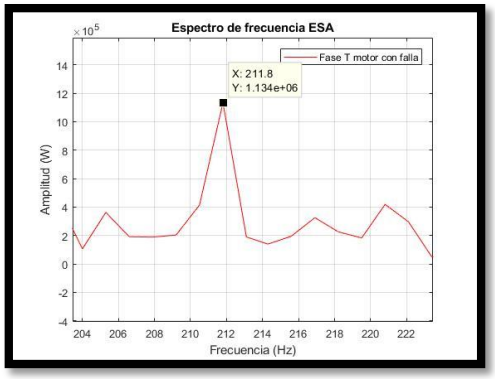



**Espectro de frecuencia técnica ESA.**

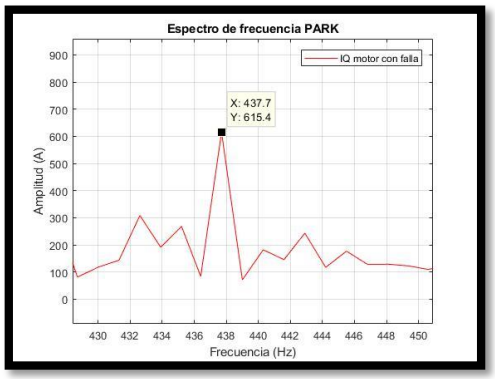
En las siguientes imágenes, se observa el comportamiento de armónicos, donde las técnicas detectan puntos de frecuencias con magnitud mayor al nivel mínimo definido para detectar una posible falla en rodamientos




**Espectro de frecuencia técnica MCSA.**




**Espectro de frecuencia técnica ESA.**




**Espectro de frecuencia técnica PARK.**

## Conclusiones

La tarjeta de adquisición de datos capaz de analizar fallas de barras rotas en rotor y rodamientos por medio de 3 técnicas (MCSA, ESA, y EPVA), mediante el procesamiento con la placa de desarrollo Teensy 4.1, obteniendo un promedio de efectividad en los análisis de 95% en detectar falla de barras rotas y 60% para falla en rodamientos.

Se definió los indicadores para la detección de fallas de barras rotas en rotor y rodamientos mediante el análisis en frecuencia del comportamiento de los motores de inducción, por medio de la FFT implementada en la placa de desarrollo Teensy 4.1, con los motores disponibles en el laboratorio guayacanes de ingeniería electrónica.

Se logró la comunicación entre los módulos del sistema desarrollado por medio de un protocolo general de comunicación I2C, para el envío de resultados de los indicadores de falla de barras rotas y rodamientos a la interfaz web externa del sistema y conocer el estado del motor.

## Referencias

[1]. D. F. Pires, V. FernãoPires, J.F. Martins, A.J. Pires, ‘’Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors based on a current and virtual flux approach’’, Energy Conversion and Management, Volume 50, Issue 4, April 2009, Pages 1026-1032.

[2]. F.J. Villalobos-Piña, R.A. Salas, ‘’Algoritmo robusto para el diagnóstico de fallas eléctricas en el motor de inducción trifásico basado en herramientas espectrales y ondeletas’’, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, Vol. 12, no, 3, p. 292-303. July–September, 2015.

[3]. E. Cabal-Yepez, M. Valtierra-Rodriguez, R.J. Romero-Troncoso, A. Garcia-Perez, R.A. Osornio-Rios, H. Miranda-Vidales, R. Alvarez-Salas, ‘’FPGA-based entropy neural processor for online detection of multiple combined faults on induction motors’’, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 30, Pages 123-130, July 2012.

[4]. Paz Parra, A.; Amaya Enciso, M.C.; Olaya Ochoa, J.; Palacios Penaranda, J.A., “Stator fault diagnosis on squirrel cage induction motors by ESA and EPVA,” in *Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA), 2013 Workshop on*, vol., no., pp.1-6, 6-7 July 2013.

[5].Siyambalapitiya, D.J.T.; McLaren, P.G., "Reliability improvement and economic benefits of on-line monitoring systems for large induction machines", IEEE Transactions On Industry Applications, Volume 26, no. 6, November/Dicember 1990.

[6] Á. Fradejas Ordax, "Aplicación de la técnica de estimación espectral MUSIC y de la Transformada de Park para la detección de fallos en motores de inducción", Pregrado, Universidad de Valladolid, 2016.

[7] G. Arboleda Yerbe, M. Narváez Paredes, "DETECCIÓN DE FALLA DE BARRAS ROTAS EN EL ROTOR DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO TIPO JAULA DE ARDILLA EMPLEANDO TÉCNICAS DE ANÁLISIS ESPECTRAL DE CORRIENTES – MCSA Y ANÁLISIS ESPECTRAL DE POTENCIA – ESA”. Pregrado, Universidad Javeriana Cali, 2014.

[8] M.M. Martínez Amaya, V. Dix Sánchez, "DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO TIPO JAULA DE ARDILLA EMPLEANDO ANÁLISIS DE VIBRACIONES”. Pregrado, Universidad Javeriana Cali, 2017.

[9] A. J. Marques Cardoso, y otros “*Rotor Cage Fault Diagnosis in Three-phase Induction Motors, by Park's Vector Approach”*. IEEE, 1995. Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95., Conference Record of the 1995 IEEE 1995.

[10] A. Aboubou, M. Sahraoui, S. Zouzou, A. Rezzoug and H. Razik, "Broken Bars AndiOr End Rings Detection In ThreePhase Induction Motors By The ·Extended Park's Vector Approach", 2004.

.

[11] A. Ibrahim, M. El Badaoui, F. Guillet and F. Bonnardot, “*A New Bearing Fault Detection Method in Induction Machines Based on Instantaneous Power Factor”*. IEEE transactions on industrial electronics, vol. 55, no. 12, 2008.

[12] J. H. Silva and A. Marques Cardoso, “*Bearing Failures Diagnosis in Three-Phase Induction Motors by Extended Park’s Vector Approach”*. IEEE, 2005.

[13] J. H. Silva and A. Marques Cardoso, “*Diagnóstico de Avarias nos Rolamentos de Motores de Indução Trifásicos”*. IEEE, 2005.

[14] J. Cusidó, L. Romeral, J. A. Ortega, J. Rosero and A. García Espinosa, “*Fault Detection in Induction Machines Using Power Spectral Density in Wavelet Decomposition”*. IEEE transactions on industrial electronics, vol. 55, no. 2, 2008.

[15] G. Didier et al., “*Rotor fault detection using the instantaneous power signature”*. IEEE International Conference on IndustrialTechnology (ICIT), 2004.

[16] M. Drif and A. Marques Cardoso, *"Rotor Cage Fault Diagnostics in Three-Phase Induction Motors, by the Instantaneous Non-Active Power Signature Analysis"*. IEEE, 2007.

[17] J. Oviedo Silvia.; E. Quiroga Jabid; G. Plata” Validación Experimental de la Metodología Motor Current Signature Analysis para un Motor de Inducción de 2 HP”. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 2014, no 70, p. 108-118.

[18] D. Tantivas ; J. Gonzales. “Detección de barras rotas en motores de inducción utilizando SMCSA (Square Motor Current Signature Analysis)”. *Res. Comput. Sci.*, 2014, vol. 73, p. 193-202.