

Diagnóstico de Fallas Eléctricas de Estator en Motores de Inducción Trifásicos mediante criterios de selección del Modelo Auto-regresivo del Fasor de Espacio Instantáneo

F.M. García-Guevara*, Francisco-Javier Villalobos-Piña*, J.A. Morones-Alba*
R. Álvarez-Salas**

*Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Aguascalientes Ags, CO 20240
MEX (Tel: (52)449-91058002 Ext. 138; e-mail: r00151319@mail.ita.mx).

** Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí SLP, CO 78290
MEX, (e-mail: ralvarez@uaslp.mx)}

Resumen: El presente trabajo propone un esquema para el diagnóstico de fallas eléctricas del estator de tipo incipiente en motores de inducción (MI) trifásicos mediante modelos auto-regresivos (AR), el cual consiste en calcular el módulo del fasor de espacio instantáneo de Park (ISP) de las corrientes de estator, posteriormente el modelo AR de dicho módulo es estimado y evaluado mediante un criterio de selección de orden del modelo, el cual es utilizado como indicador de falla. Se efectuaron pruebas experimentales bajo diferentes escenarios de fallas eléctricas del estator, mediante la alteración de un MI para la inserción de dichos escenarios. Una comparativa entre el esquema propuesto y la transformada rápida de Fourier base dos (FFT2) para el caso sano y con falla es efectuado, demostrando que es una técnica alternativa redundante para el diagnóstico de problemas eléctricos de estator.

Palabras clave: Diagnóstico de fallas, fasor de espacio instantáneo de Park (ISP), motores de inducción, modelo autor-regresivo (AR), transformada rápida de Fourier base dos (FFT2).

1. INTRODUCCIÓN

El motor de inducción (MI) trifásico es ampliamente reconocido como el caballo de batalla del sector industrial (Trigeassou, 2011), debido a su robustez, estructura compacta, bajo costo y mantenimiento casi nulo (Hamid et al., 2013). Las fallas internas debido a problemas eléctricos, magnéticos, mecánicos, térmicos y estrés ambiental durante su operación, no suelen ser detectadas en etapas tempranas (Bindu y Vinod, 2014), por lo que el monitoreo y la detección de fallas en sus etapas tempranas es una necesidad esencial, especialmente en procesos críticos (Zang et al., 2011). Esta clase de motor ocupa la posición casi exclusiva en la conversión de energía eléctrica a mecánica, siendo responsable de casi el 90% de la energía consumida por los motores eléctricos, acorde con (Wei et al., 2010) cada año alrededor de 3 millones de motores se dañan representando un gran desperdicio de energía y elevados costos por su reparación.

La distribución de fallas de los componentes del MI mostrada en la tabla 1, han sido ampliamente reportadas como en (Bonnet y Yung, 2008; Zhang, P. et al, 2011), que además describen las técnicas más utilizadas para su detección.

El fasor de espacio instantáneo (ISP, por sus siglas en inglés) es una de las herramientas empleadas para diagnóstico de fallas eléctricas en sistemas eléctricos trifásicos balanceados, ya que permite analizar el desbalance en las corrientes provocado por la presencia de fallas (Milanez y Emanuel, 2003).

Tabla 1. Comparativa de distribución de fallas en el MI

Componente	IEEE % de falla	EPRI % de falla	Allianz % de falla
Baleros y rodamientos	44	41	13
Estator	26	36	63
Rotor	8	9	13
Otros	22	14	8

El modelo AR ha sido utilizado en el área de diagnóstico de de fallas en rodamientos (Wang et al., 2008; Liu et al., 2012), en sistemas de acoplamiento por medio de engranes (Zhou et al., 2007; Nikhar et al., 2013), en ellos se estima la densidad espectral de potencia (DEP), a partir de la función de transferencia del modelo AR en el dominio de la frecuencia, donde el análisis armónico (Verde et al., 2013) permite detectar aquellas fallas que provocan frecuencias atípicas y oscilaciones parásitas.

Independientemente del método elegido para realizar la estimación del modelo AR, es necesario determinar el orden p de dicho modelo, lo que implica establecer un criterio para su selección, y posteriormente evaluar la función de transferencia del modelo AR obtenido en el dominio de la frecuencia. Es por ello que el presente trabajo propone un esquema para la detección de fallas eléctricas incipientes de estator no invasivo, mediante el modelado AR del módulo del ISP, utilizando el criterio de selección del orden del

modelo como un indicador del estado de salud del MI, en lugar de continuar con el modelo AR como un estimador espectral, como se muestra en la figura 1.

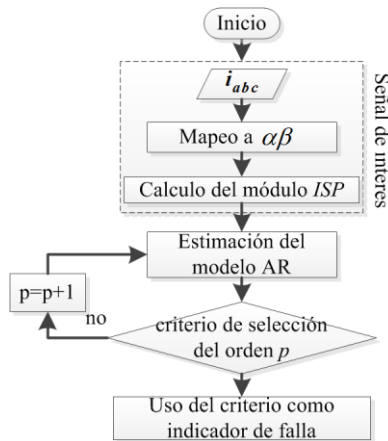


Fig. 1. Diagrama de flujo del esquema de diagnóstico.

2. PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Con la finalidad de evaluar el esquema propuesto de diagnóstico de fallas eléctricas de estator, se construyó una plataforma experimental esquematizada en la figura 2. Dicha plataforma consiste en un MI sano, un grupo de motores modificados, un motor de CD utilizado para inducir o generar un par de carga, un inversor de puente completo y un sistema de regeneración, los cuales integran el sistema electrónico de potencia, además de una unidad central de procesamiento, para efectuar el control e instrumentación del mismo realizando la adquisición de información de corriente, posición y velocidad mecánica.

2.1 Unidad central de procesamiento

El sistema de diagnóstico de fallas utiliza un procesador de señales digitales (DSP por sus siglas en inglés) de punto flotante de 32 bits de Texas Instrument TMS320F28335, el cual adquiere las corrientes de estator por medio de sensores de efecto Hall CLN 100FW BELL así como la posición angular de la flecha del rotor a través de un encoder óptico en cuadratura. La información adquirida es discretizada y enviada a una computadora personal (PC), para ser analizada en un programa desarrollado en un trabajo previo (Villalobos y Alvarez, 2011) basado en el lenguaje de alto nivel Delphi 7.

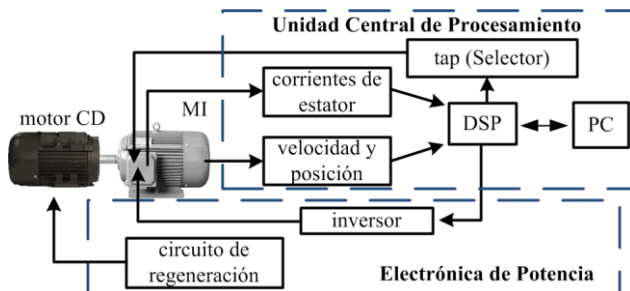


Fig. 2. Diagrama simplificado de la plataforma experimental.

2.2 Electrónica de potencia

El sistema electrónico de potencia consiste en un inversor trifásico de puente completo, con una capacidad máxima de operación de 1200V y 200A por rama. Opera bajo un esquema de control de lazo abierto Volts-Hertz controlado por el DSP de la unidad central de procesamiento para establecer la velocidad del MI. La segunda parte que conforma la etapa de potencia es un sistema de regeneración, que controla el par de carga sobre el MI, está constituido por un motor de CD que opera como un generador y un banco de resistencias. El par de carga es definido mediante la modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) generado por un DSP de Microchip dsPIC30F4011.

3. INSERCIÓN DE FALLAS EN EL ESTATOR DEL MI

3.1 Modificación al MI

Con la finalidad de insertar diferentes escenarios de falla de cortocircuito o de circuito abierto en una o varias de las fases del estator, el MI fue rebobinado. El esquema eléctrico de un motor Siemens de alta eficiencia de 3HP modelo GP10 se muestra en la figura 3. El cual está constituido por 6 grupos de bobinas (A, A', B, B' y C, C'), dos grupos por fase distribuidos en 36 ranuras, tres bobinas concéntricas por grupo, 45 vueltas cada una y con tres alambres calibre 22 (American Wire Gauge AGW). El funcionamiento del MI a baja tensión de acuerdo con las especificaciones del fabricante, se logra mediante la conexión de la doble estrella en paralelo, suministrando el voltaje de fase, V_{AN} a las terminales 1 y 7, V_{BN} a 2 y 8, V_{CN} a 3 y 9, y uniendo las terminales 4, 5 y 6 para conformar el neutro de la estrella Y_N .

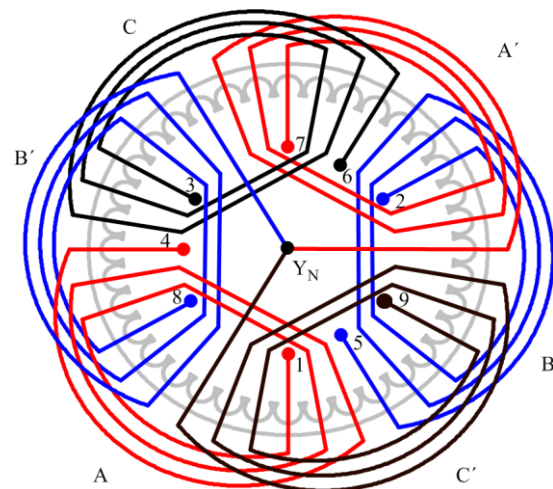


Fig. 3. Esquema eléctrico del estator de un MI trifásico.

La inserción de fallas en el estator se logra mediante la conexión o desconexión de segmentos del devanado de la fase C, a través de la reconexión del voltaje de fase V_{CN} o el neutro de la estrella Y_N con las terminales ($C_1, \dots, C_8$). Las posibles conexiones se esquematizan con líneas punteadas en la figura 4

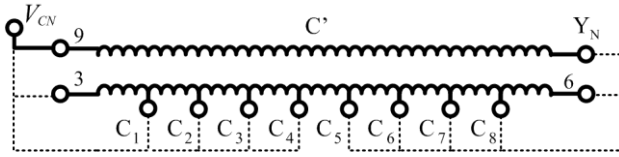


Fig. 4. Modificación del MI mediante la inserción de derivaciones en el devanado de la fase C del estator.

3.2 Caracterización del MI

La caracterización de los parámetros eléctricos del MI es realizada a una frecuencia de la línea (f_l) de 60 Hz a través del método industrial o de los tres voltímetros, el cual consiste en la medición de los voltajes V_1 , V_2 , V_3 , y la corriente de estator I por cada fase con la incorporación de una resistencia patrón R_p , como se muestra en la figura 5, donde V_1 es el voltaje en el inductor, V_2 es el voltaje en la R_p , V_3 es el voltaje de fase en el inductor a analizar, ϕ' es el ángulo complementario del ángulo ϕ de fase entre el voltaje y la corriente como se ilustra en la figura 6.

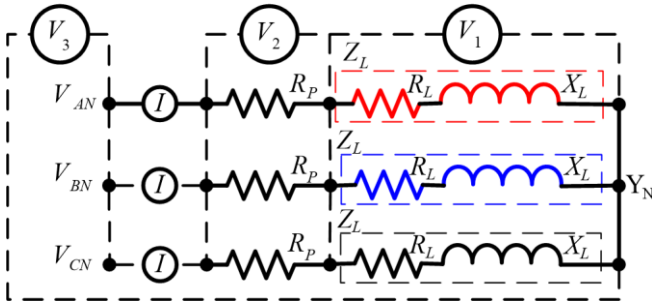


Fig. 5. Método industrial para la caracterización de parámetros eléctricos del MI.

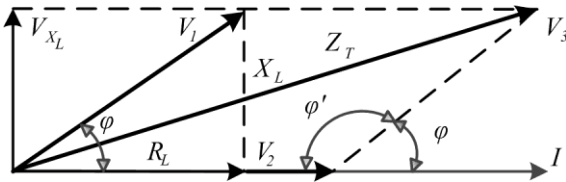


Fig. 6. Representación fasorial.

El ángulo complementario es evaluado mediante la siguiente expresión

$$\phi = \cos^{-1} \left((V_3^2 - (V_1^2 + V_2^2)) / 2V_1V_2 \right) \quad (1)$$

la impedancia del inductor Z_L

$$Z_L = V_1 / I$$

la reactancia del inductor X_L

$$X_L = Z_L \sin \phi$$

su resistencia R_L

$$R_L = Z_L \cos \phi$$

finalmente su inductancia L

$$L = X_L / 2\pi f_l \quad (5)$$

Los resultados para cada fase son mostrados en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros eléctricos del MI sano.

Parámetros	Fase A	Fase B	Fase C
L (mH)	5.055	5.025	5.035
Z_L (Ω)	1.909	1.899	1.902
X_L (Ω)	1.905	1.894	1.898
R_L (Ω)	0.127	0.128	0.126

4. ESQUEMA DE DIAGNÓSTICO

El esquema de diagnóstico de fallas eléctricas de estator del MI trifásico comienza con el análisis del desbalance entre las corrientes de estator por medio del módulo del ISP (Milanez y Emanuel, 2003). Para ello se conforma el vector de mediciones

$$\mathbf{i}_{abc}(n) = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_a(n) \\ \mathbf{i}_b(n) \\ \mathbf{i}_c(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Ia_1, Ia_2, \dots, Ia_N] \\ [Ib_1, Ib_2, \dots, Ib_N] \\ [Ic_1, Ic_2, \dots, Ic_N] \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde $n=1,2,\dots,N$ es n -ésima muestra de la corriente de estator de cada una de las tres fases, el cual es mapeado al marco de referencia α - β :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_o \end{bmatrix} = 1/\sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos(-2\pi/3) & \cos(2\pi/3) \\ 0 & -\sin(-2\pi/3) & -\sin(2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

posteriormente el módulo del ISP se obtienen a partir de:

$$ISP_n = \|\mathbf{i}_{\alpha\beta}\| = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \quad (7)$$

4.1 Modelo AR

El siguiente paso dentro del esquema de diagnóstico es el cálculo de los coeficientes del modelo AR de orden p , el cual es un filtro de respuesta finita (FIR, por sus siglas en inglés) y queda definido de la forma:

$$ISP_n = w + \sum_{k=1}^p A_k ISP_{n-k} + \varepsilon_n \quad (8)$$

donde w es un término de intercepción para el análisis de series temporales con media distinta de cero, ε_n es ruido blanco, A_k son los coeficientes del modelo y ISP_{n-k} es el valor del módulo del ISP atrasado k muestras.

- (3) El cálculo de los coeficientes del modelo AR en el presente esquema es a través del algoritmo de estimación por mínimos cuadrados desarrollado por (Neumaier y Schneider, 2001), donde el modelo AR (8) es aproximado en la forma de un modelo de regresión, es expresado como:
- (4)

$$ISP_n = Bu_n + \varepsilon_n$$

con una matriz de parámetros

$$B = [w \quad A_k]$$

y un vector de estados dinámicos dado por

$$u_n = [1 \quad ISP_{n-1} \quad \dots \quad ISP_{n-p}]^T$$

En términos de las matrices de momentos

$$U = \sum_{n=1}^N u_n u_n^T,$$

$$ISP = \sum_{n=1}^N ISP_n ISP_n^T$$

y

$$W = \sum_{n=1}^N ISP_n u_n^T$$

la estimación de los mínimos cuadrados de la matriz de parámetros (10) puede ser escrita como:

$$\hat{B} = W U^{-1}$$

Por otra parte la varianza residual está dada por:

$$\hat{C} = \frac{1}{N-p+1} (ISP - W U^{-1} W^T)$$

la cual es proporcional al complemento Schur de la matriz

$$\Gamma = \begin{bmatrix} U & W^T \\ W & ISP \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^N \begin{bmatrix} u_n \\ ISP_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_n^T & ISP_n^T \end{bmatrix}$$

de la matriz de momentos

$$\Gamma = K^T K$$

perteneciente a la matriz de datos

$$K = \begin{bmatrix} u_1^T & ISP_1^T \\ \vdots & \vdots \\ u_N^T & ISP_N^T \end{bmatrix}$$

La estimación de mínimos cuadrados (15) entonces es calculada a partir de la factorización QR de la matriz

$$K = QR$$

con una matriz ortogonal Q y una matriz triangular superior

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ 0 & R_{22} \end{bmatrix}$$

ésta descomposición lleva a la factorización de Cholesky

$$(9) \quad \Gamma = K^T K = R^T R \quad (22)$$

de la matriz de momentos, esto es:

$$(10) \quad \begin{bmatrix} U & W^T \\ W & ISP \end{bmatrix} = R^T R = \begin{bmatrix} R_{11}^T R_{11} & R_{11}^T R_{12} \\ R_{12}^T R_{11} & R_{12}^T R_{12} + R_{22}^T R_{22} \end{bmatrix} \quad (23)$$

(11) de ésta factorización se encuentran las estimaciones de la matriz de covarianza residual

$$\hat{C} = \frac{1}{N-p+1} R_{22}^T R_{22} \quad (24)$$

(12) y la matriz de parámetros

$$(13) \quad \hat{B} = R_{11}^{-1} R_{12}^T \quad (25)$$

que contiene la estimación de los coeficientes del modelo AR y el termino de intercepción w .

(14) Para la selección del orden p del modelo AR se implementaron el criterio Bayesiano de Schwarz (SBC, por sus siglas en inglés) y de la predicción del error final de Akaike (FPE, por sus siglas en inglés) los cuales son evaluados para distintos órdenes por medio de las expresiones:

$$(15) \quad SBC = l_p - \left(1 - \frac{p+1}{N}\right) \log N \quad (26)$$

(16) y

$$FPE = l_p - \log \left(\frac{N(N-p+1)}{N+p+1} \right) \quad (27)$$

(17) donde l_p es:

$$l_p = \log \det \Delta_p \quad (28)$$

con

$$(18) \quad \Delta_p = R_{22}^T R_{22} \quad (29)$$

4.1 Análisis frecuencial

El esquema de diagnóstico propuesto es comparado con un análisis en el dominio de la frecuencia utilizando el algoritmo de la transformada rápida de Fourier base 2 (FFT2), para el caso de la falla eléctrica del estator el espectro de firma de falla f_{est} del ISP (Dirf y Marques, 2008) ocurre en múltiplos de m del doble de la f_i , donde $m=1,2,\dots,\infty$

$$f_{est} = 2mf_i \quad (30)$$

(21) Dado que la magnitud del espectro de firma de falla decrece conforme el múltiplo m incrementa, el armónico principal $m = 1$ es estudiado y obtenido:

$$f_{est} = 2f_i \quad (31)$$

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se efectuó un análisis comparativo entre el espectro de firma de falla del estator mediante la FFT2 y el valor de los criterios de selección SBC y FPE (ecuaciones 26 y 27) del modelo AR (5), los datos recabados en dicho análisis se obtuvieron a partir del módulo del ISP proveniente de 8192 muestras de las mediciones de corrientes de cada una de las tres fases del estator con un total de 20 experimentos por cada uno de los tres escenarios de falla; MI sano y dos casos de falla que se muestran en la tabla 3. Indicando el porcentaje de cambio en la magnitud $\Delta\%$ entre los distintos casos de falla con respecto al valor promedio del estado sano.

La condición sana es obtenida conectando V_{CN} a la terminal 3 y Y_N a la terminal 6, mientras que las condiciones de falla para el caso 1 V_{CN} es reconectado a la terminal C_1 y el segundo caso Y_N se reconecta a la terminal C_8 . Todos los experimentos fueron capturados a una frecuencia de muestreo $f_s = 3840\text{Hz}$, con un par de carga de 0.4 Nm para velocidades de 1200 rpm. @ $f_i = 40\text{Hz}$, 1500 rpm. @ $f_i = 50\text{Hz}$ y 1800 rpm. @ $f_i = 60\text{Hz}$.

Tabla 3. Parámetros del MI para diferentes escenarios de falla.

Parámetro	Sano	$\Delta\%$ Caso 1	$\Delta\%$ Caso 2
L (mH)	5.035	6.494	8.639
Z_L (Ω)	1.902	6.519	8.622
X_L (Ω)	1.898	6.480	8.640
R_L (Ω)	0.126	7.936	12.698

5.1 Resultados del análisis espectral

El espectro de firma de falla del estator correspondiente a los tres casos reportados en la tabla 3 a una velocidad de 1800 rpm con una f_i de 60 Hz, muestran en su contenido armónico una componente en $f_{est} = 120\text{Hz}$ que incrementa su magnitud conforme aumenta el nivel de falla como se observa en la figura 7. El valor promedio de la magnitud de dicho componente así como el porcentaje de cambio $\Delta\%$ de cada uno de los escenarios para tres diferentes velocidades se resumen en la tabla 4.

5.2 Resultados del análisis mediante modelo AR

El valor promedio de los criterios SBC y FPE del modelo AR de 3 escenarios de falla de estator analizados con el MI operando a una velocidad de 1800 rpm evaluados para distintos órdenes $p = 2, \dots, 50$ se muestra en la figura 8, en la cual se aprecia un comportamiento decreciente en el valor de ambos criterios para los distintos escenarios conforme aumenta el orden del modelo, siendo menor el valor para el criterio FPE con respecto al SBC para todos los escenarios, pero manteniendo una misma tendencia entre ambos criterios. Los resultados de un modelo AR $p = 30$ evaluado para tres diferentes velocidades se resumen en la tabla 5.

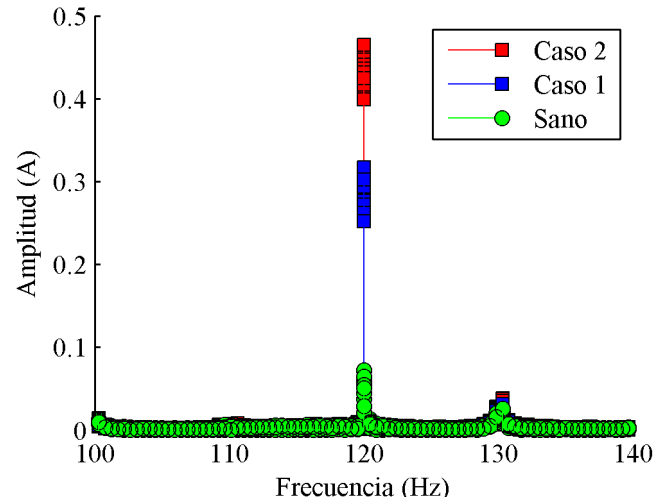


Fig. 7. Espectro de firma de falla del módulo del ISP de tres escenarios de falla a una velocidad de 1800 rpm.

Tabla 4. Valor promedio del espectro de firma de falla de tres diferentes escenarios a diferentes velocidades.

f_i	Sano	$\Delta\%$ Caso 1	$\Delta\%$ Caso 2
60 (Hz)	0.044	552	891
50 (Hz)	0.025	655	960
40 (Hz)	0.029	623	1002

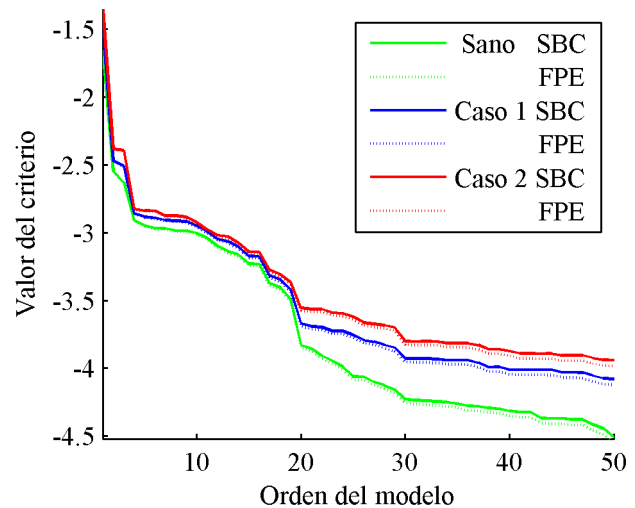


Fig. 8. Valor promedio de los criterios SBC y FPE de tres escenarios de falla a una velocidad de 1800.

Tabla 5. Valor promedio de los criterios SBC y FPE evaluados a un orden $p = 30$ de tres diferentes escenarios a diferentes velocidades.

f_i (Hz)	Sano		$\Delta\%$ Caso 1		$\Delta\%$ Caso 2	
	SBC	FPE	SBC	FPE	SBC	FPE
60	-4.228	-4.255	7.671	7.619	11.281	11.203
50	-4.436	-4.463	9.457	9.395	14.103	14.007
40	-4.381	-4.408	4.893	4.862	6.598	6.556

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos del esquema de diagnóstico propuesto muestran que es factible su implementación para la detección de fallas incipientes de corto circuito en los devanados del estator del MI ya que es posible distinguir entre los diferentes niveles de falla y el caso sano al igual que en el análisis en el dominio de la frecuencia. El uso en conjunto de ambos esquemas de diagnóstico brindan una mayor seguridad en el juicio de las condiciones de salud del MI ya que se cuenta con dictámenes de tipo redundante.

El porcentaje de cambio arrojado por ambos criterios para las distintas velocidades analizadas es muy similar (0.6% de diferencia entre ambos criterios) por lo que resulta prácticamente indistinto cuál de estos utilizar como indicador del estado de salud de la MI, ya que el costo computacional de las expresiones (24 y 25) es muy similar.

El comportamiento decreciente en el valor promedio de los criterios de selección conforme aumenta el orden del modelo AR, es un indicativo de que la estimación tiende a ser más precisa, pero aumenta su costo computacional en una proporción $(N+p+2)(p+1)^2$ acorde con (Neumaier y Schneider, 2001), para un modelo de orden $p \geq 20$ el porcentaje de cambio entre los casos analizados tiende a mantenerse, indicando para el propósito de diagnóstico que no es necesario seleccionar un modelo AR de un orden muy alto.

Es posible detectar la presencia de una falla incluso desde modelos AR de orden bajo ($p=1$) pero no es posible cuantificar la magnitud de dicha falla. Mientras que para modelos de mayor orden y dados los alcances del presente trabajo, en la cual sólo se caracterizaron los parámetros eléctricos en el estator del MI a una f_i de 60 Hz, se muestra que para esta frecuencia de operación del MI existe una proporcionalidad entre el nivel de falla para el primer caso es de 6.4% en el valor de la inductancia y en el arrojado por los criterios es de 7.6%, mientras que para el segundo caso de 8.6% contra un 11.2%, por lo que en un trabajo futuro es necesario realizar la caracterización del MI para distintas frecuencias de línea y así verificar si es posible cuantificar el nivel del daño del mismo, sin necesidad de evaluar la función de transferencia del modelo AR para obtener una DEP como es comúnmente utilizado en la literatura.

Debido al comportamiento decreciente de los valores del indicador de falla propuesto, el establecimiento de un umbral depende del orden del modelo seleccionado.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue financiado por el instituto tecnológico de Aguascalientes ITA y la universidad autónoma de San Luis Potosí UASLP, con recursos de los convenios C14-FAI-04-42.42. y PROMEP/ITA/103.5/13/8890 respectivamente.

REFERENCIAS

- J.C. Trigeassou (2011). *Electrical Machines Diagnosis*. Wiley, USA.
- H.A. Toliyat, S. Nandi, S. Choi, H. y Meshing-Kelk (2013). *Electric Machines*. CRC Press, USA.
- S. Bind y V.V. Thomas (2014). Diagnoses of internal faults of three phase squirrel cage induction motor — A review. En: *International Conference on Advances in Energy Conversion Technologies (ICAECT)*. 48 – 54.
- P. Zhang, Y. Du, T.G. Habetler, G. y Bin Lu, B. (2011). A Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium-Voltage Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Application* **47**, 34–46.
- Y. Wei S. Chao y L. Zhenxing (2010) Fault diagnosis way based on CLEAN algorithms in Squirrel Cage Induction Motors. En: *2nd International Conference on Education Technology and Computer (ICETC)*, 39–42.
- A.H. Bonnet y C. Yung (2008). Increased efficiency versus increased reliability. *IEEE Transactions on Industrial Applications* **14**, 29–36.
- D.L. Milanez y A.E. Emanuel (2003). The instantaneous-space-phasor: a powerful diagnosis tool. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **52**, 143–148.
- G. Wang, Z. Luo, X. Qin, Y. Leng y T. Wang (2008). Fault identification and classification of rolling element bearing based on time-varying autoregressive spectrum. *Mechanical Systems and Signal Processing* **22**, 934–947.
- C. Liu, X. Zhou, S. Yang, W. Liang y Q. Miao (2012). Cooling Fan Bearing Diagnosis Based on AR & MED. En: *International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering*. 622–626.
- G.H. Zhou, C. Zuo, J.Z. Wang y S.X. LIU (2007). Gearbox Fault Diagnosis Based on Wavelet-AR Model. *IEEE International Conference on Machine Learning and Cybernetics* **2**, 1061–1065.
- N.K. Nikhar, S.S. Patankar y J.V. Kulkarni (2013). Gear Tooth Fault Detection by Autoregressive Modelling. En: *Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT)*. 1-6
- R.C. Verde, S. Gentil y M.R. Morales (2013). *Monitoreo y diagnóstico automático de fallas en sistemas dinámicos*. Trillas, México.
- A. Neumaier y T. Schneider (2001). Estimation of parameters and eigenmodes of multivariate autoregressive models. *ACM Transactions on Mathematical Software* **27**, 27–57.
- F.J. Villalobos-Piña, R. Álvarez-Salas (2011). *Diagnóstico de Fallas en Motores de Inducción, diagnóstico mediante el uso del ISP (Instantaneous Space Phasor)*. Editorial Académica Española.
- M. Drif y C. Marques (2008). Airgap eccentricity fault diagnosis, in three-phase induction motors, by complex apparent power singature analysis. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion SPEEDAM* **55**, 1404–1410.