



Comité Nacional Venezolano

III CONGRESO VENEZOLANO DE REDES Y ENERGÍA ELÉCTRICA

Marzo 2012

A1-48

Evaluación Energética de Motores de Inducción Sub Cargados, en Presencia de Armónicas y Desequilibrios de Tensión

J. Aller*

A. Bueno*

G. Machado*

L. Salazar**

Universidad Simón Bolívar

*Dpto. De Conversión y Transporte de Energía

**Dpto. de Tecnología Industrial

RESUMEN

Los motores de inducción representan más del 80% de las cargas industriales y en una evaluación preliminar se identifican varios aspectos que impactan negativamente la eficiencia de estos convertidores: operación sub cargada por dimensionamiento excesivo, tensiones fuera de los rangos especificados en las normativas, presencia de armónicas y desequilibrios en la fuente de alimentación. Todas estas condiciones operativas inciden en la disminución de la eficiencia del motor y algunas incluso pueden reducir su vida útil, haciendo necesaria su des-clasificación (re-evaluación de los valores nominales de la máquina).

En este trabajo se desarrolla un algoritmo recursivo que determina el modelo en vectores espaciales de la máquina de inducción, a partir de los datos de placa y algunos datos adicionales obtenidos a partir de la experiencia y las condiciones normales de diseño, utilizando técnicas de optimización por mínimos cuadrados. Este modelo permite evaluar las pérdidas de la máquina en diferentes condiciones de operación en ambientes industriales a partir de las medidas de tensión, corriente y potencia realizadas en bornes del motor. El modelo puede considerar los efectos de la operación a sub o sobre tensión, carga reducida, desequilibrios de tensión y fuentes con presencia de armónicas. Este modelo compara las pérdidas del convertidor con las obtenidas en operación nominal y puede considerar la utilización de variadores de velocidad o esquemas de arranque a tensión reducida.

Los resultados de esta evaluación energética se pueden utilizar para identificar la operación de máquinas en condiciones de bajo rendimiento, o con pérdidas mayores a las nominales. Esta información permite analizar los correctivos necesarios y evaluar el nuevo comportamiento de la máquina cuando cambien las condiciones de operación. Este algoritmo será integrado en el futuro en un analizador inteligente de energía para que un personal técnico no especializado pueda realizar el mantenimiento preventivo y reducir de esta forma los costos de inversión y aumentar la eficiencia.

PALABRAS CLAVE

Motor de inducción, modelación, estimación paramétrica, desequilibrios, armónicos, eficiencia, pérdidas.

Universidad Simón Bolívar, Dpto. de Conversión y Transporte de Energía, Valle de Sartenejas, Baruta, Edo. Miranda, Caracas – Venezuela, tlf. +58-212-9063735, email: jaller@usb.ve

INTRODUCCIÓN

Las máquinas eléctricas son elementos fundamentales en el sector industrial y comercial. Son utilizadas para accionar bombas, compresores, máquinas y mecanismos, ventiladores, etc. La máquina eléctrica más utilizada es el motor de inducción por su robustez, fácil mantenimiento y reducido costo. Las máquinas de inducción pueden construirse en gran variedad de potencias y velocidades. Las máquinas de inducción necesitan consumir pérdidas en los devanados o jaula del rotor para poder entregar el par a la carga. Este principio de funcionamiento hace que su rendimiento sea inferior al de las máquinas sincrónicas o los motores de reluctancia y mantener este lo más alto posible es una medida de ahorro energético muy importante.

En el sector industrial y comercial existen dificultades para determinar las condiciones de operación de los motores de inducción. Esta condición depende de diferentes factores como los niveles de tensión aplicada en las bobinas estáticas, los desequilibrios entre las tensiones de fase, la condición de carga o sobrecarga y el contenido armónico de la fuente o del accionamiento utilizado. Estas condiciones de operación pueden ser analizadas utilizando modelos precisos de las máquinas de inducción [1,2,3]. Estos modelos, por otra parte, necesitan la determinación de sus parámetros que no siempre son fáciles de realizar en condiciones de campo [4,5,6,7,8].

En este trabajo se presenta una técnica de identificación de los parámetros de las máquinas de inducción, válidos en la zona de operación cercana a la velocidad nominal, que utiliza los datos nominales de la placa y algunos valores frecuentes de estos equipos. Estos datos son procesados mediante un algoritmo iterativo cuya convergencia garantiza que el dato nominal de placa coincida con los parámetros calculados.

Utilizando el modelo y los parámetros determinados previamente es posible evaluar la condición de operación de la máquina una vez que se han medido los valores efectivos de las tres tensiones línea-línea y las corrientes de línea, así como la potencia activa consumida. Las evaluaciones armónicas requieren los registros instantáneos digitales de las tensiones aplicadas al convertidor.

Los resultados obtenidos permiten identificar la estimación de la velocidad, par mecánico, eficiencia del punto de operación, energía consumida en pérdidas. También es posible con esta herramienta evaluar el ahorro de energía que tendría la empresa cuando se corrige la condición de operación a una más favorable. Con esta información los departamento de mantenimiento y operación pueden decidir invertir en máquinas más eficientes, solventar problemas de calidad de servicio eléctrico o cambiar las condiciones de carga del accionamiento.

El sistema se ha utilizado en varias empresas del sector productivo venezolano y ha demostrado su valor para diagnosticar problemas operativos y proponer soluciones adecuadas que mejoren el rendimiento y alarguen la vida útil de los convertidores.

MODELO DE LA MAQUINA DE INDUCCIÓN

El modelo clásico de la máquina de inducción es adecuado para la evaluación de condiciones de régimen permanente, especialmente cuando se analizan velocidades del rotor muy cercanas a la velocidad sincrónica. Fuera de esta zona el efecto de las barras profundas del rotor afectan los resultados de este modelo. En la figura 1(a) se presenta el modelo clásico y en la figura 1(b) su equivalente de Thèvenin que simplifica la evaluación de las características más importantes del convertidor. El modelo de Thèvenin permite determinar directamente la corriente del rotor que es necesaria para evaluar el par eléctrico entregado al eje:

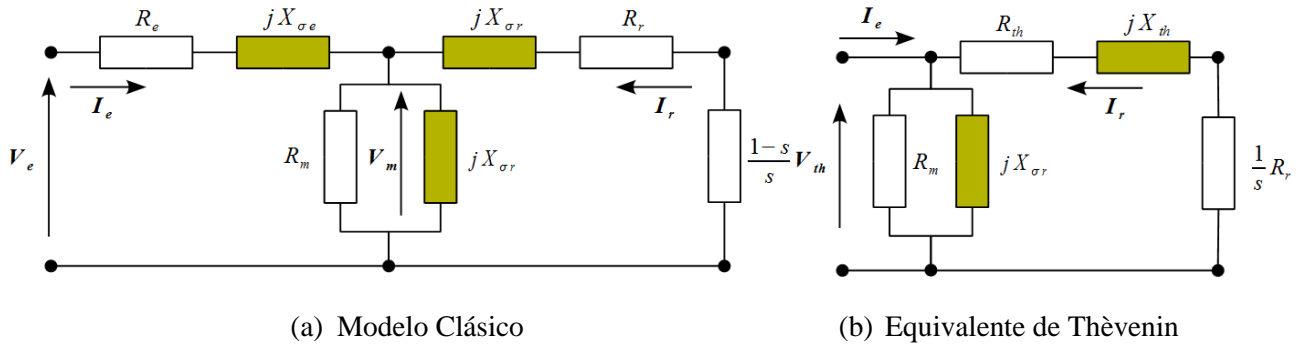


Fig. 1 Modelo de la máquina de inducción en régimen permanente

$$T_e = \frac{3}{\omega_e} I_r^2 \frac{R_r}{s} = \frac{3 \cdot V_{th}^2 \cdot R_r}{\omega_e \cdot s \left[\left(\frac{R_r}{s} + R_{th} \right)^2 + X_{th}^2 \right]} \approx \frac{3 \cdot V_{th}^2 \cdot s}{\omega_e \cdot R_r} \text{ si } s \rightarrow 0 \quad (1)$$

En la expresión (1) se puede observar que la resistencia del rotor es el parámetro más importante de la máquina porque determina la característica par-deslizamiento en todas las velocidades cercanas a la velocidad sincrónica. El par nominal, el deslizamiento nominal y la tensión de la máquina son datos de placa y por este motivo la resistencia del rotor R_r se puede calcular con bastante precisión de esta expresión.

La determinación de los parámetros de magnetización se realiza muy fácilmente mediante una prueba de vacío, donde se midan las tensiones, corrientes y potencia en esta condición. Sin embargo, en muchos casos no es posible parar el proceso productivo para realizar el ensayo y en caso de hacerlo no es posible desacoplar la carga mecánica accionada. Por este motivo es preferible utilizar datos típicos para los parámetros R_m y X_m . Generalmente las máquinas de menos de 3 kW consumen corrientes de vacío de $\frac{1}{2}I_n$. Entre 3 kW y 100 kW la corriente de magnetización es aproximadamente $\frac{1}{3}I_n$ y en máquinas mayores a 100 kW esta corriente tiende a $\frac{1}{4}I_n$. Normalmente su componente resistiva es muy pequeña y puede ser despreciada sin cometer errores muy grandes. Una vez estimados la resistencia del rotor R_r y la reactancia de magnetización X_m , los parámetros R_{th} y X_{th} se determinan para ajustar el resto de los datos típicos de placa: El rendimiento y factor de potencia nominal.

Una estimación inicial de estos parámetros se realiza calculando la corriente del rotor \mathbf{I}_r :

$$\mathbf{I}_m = \mathbf{I}_{en} - \mathbf{I}_m = I_n \angle -\cos^{-1}(fp) - \frac{V_{th}}{jX_m} = \frac{V_{th}}{\left(R_{th} + \frac{R_r}{s_n} \right) + jX_{th}} \quad (2)$$

La ecuación (2) es una expresión compleja con dos incógnitas R_{th} y X_{th} , y de ella es posible calcular una primera estimación para estos dos parámetros.

Las diferentes aproximaciones utilizadas tales como la suposición de la tensión de Thévenin, la corriente de magnetización o la tendencia a pequeños deslizamientos para determinar la resistencia rotórica, originan parámetros no precisos pero que sirven de valores iniciales a un algoritmo de optimización que utiliza los datos nominales para converger y que se discuten en la siguiente sección.

El modelo ajustado permite directamente evaluar la condición de operación de máquinas de inducción sometidas a sobre carga, sub cargadas o con tensiones trifásicas balanceadas fuera de rango por encima o por debajo de los valores nominales. Sin embargo, cuando existen desequilibrios en las tensiones aplicadas es necesario utilizar modelos de secuencia y componentes simétricas. En la figura 2 se presenta el modelo de la máquina de inducción en componentes de secuencia.

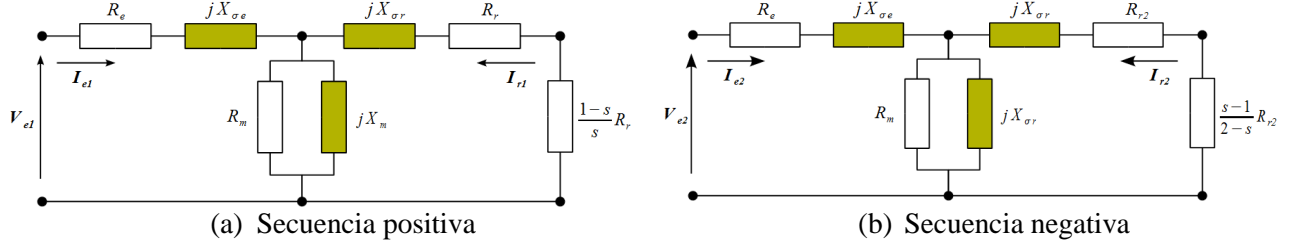


Fig. 2 Modelo de la máquina de inducción en presencia de desequilibrios de tensión

El sistema de ecuaciones que describen el comportamiento del modelo de la máquina de inducción en régimen desequilibrado son [1,2,3]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{e1,2} \\ \mathbf{V}_{r1,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e + j\omega_e L_e & j\omega_e M_{er} \\ j\omega_e M_{er} & \frac{R_{r1,2}}{s_{1,2}} + j\omega_e L_{r1,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{e1,2} \\ \mathbf{I}_{r1,2} \end{bmatrix} \quad T_e = \frac{1}{\omega_e} \left\{ \frac{I_{r1}^2 R_{r1}}{s_1} - \frac{I_{r2}^2 R_{r2}}{s_2} \right\} \quad (3)$$

$$s_1 = \frac{\omega_e - \omega_m}{\omega_e} ; s_2 = \frac{\omega_e + \omega_m}{\omega_e} ; s_1 + s_2 = 2$$

En el modelo (3) los subíndices 1 y 2 se refieren a las componentes de secuencia positiva y negativa respectivamente. La reactancia de magnetización $j\omega_e M_{er}$ del modelo (3) coincide con la reactancia de magnetización jX_m , la reactancia de dispersión del estator $jX_{\sigma e}$ es equivalente a $j\omega_e(L_e - M_{er})$ y la reactancia de dispersión del rotor $jX_{\sigma r}$ a $j\omega_e(L_r - M_{er})$. La resistencia e inductancia del rotor en secuencia negativa debe ajustarse por efecto pelicular de acuerdo con la expresión [9]:

$$\frac{R_r(s_2)}{R_r(s_1)} = \xi \frac{\sinh(2\xi) + \sin(2\xi)}{\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)} ; \frac{L_{\sigma r}(s_2)}{L_{\sigma r}(s_1)} = \frac{3}{2\xi} \frac{\sinh(2\xi) - \sin(2\xi)}{\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)} ; \xi \approx h_{ranura} \sqrt{\frac{s_2 \omega_e \mu_0 \sigma_r}{2}} \quad (4)$$

donde h_{ranura} es la profundidad de la ranura del rotor y σ_r es la conductividad de las barras rotóricas.

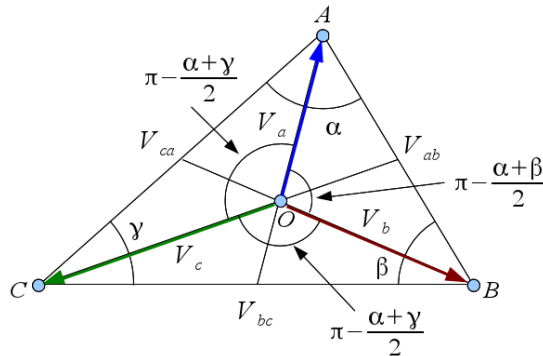


Fig. 3 Triángulo desequilibrado de tensiones trifásicas

En bornes de la máquina de inducción es posible medir, en cualquier configuración las magnitudes de las tensiones entre fases (V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}) tal como se muestra en el triángulo de la figura 3. Utilizando los teoremas del seno y del coseno es posible determinar los ángulos internos del triángulo α , β y γ , con los cuales se pueden obtener los desfases de las tensiones al neutro V_a , V_b y V_c , que se obtienen a partir del Teorema de Apolonio [7]. Con estos tres datos es posible encontrar las expresiones fasoriales de las tensiones línea a línea utilizando las expresiones siguientes:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{V_{bc}}{V_{ab}} \sin(\gamma)\right); \beta = \arcsin\left(\frac{V_{ca}}{V_{ab}} \sin(\gamma)\right); \gamma = \arccos\left(-\frac{V_{ab}^2 - V_{bc}^2 - V_{ca}^2}{2V_{bc}V_{ca}}\right) \quad (4)$$

$$V_a = \frac{1}{3}\sqrt{2(V_{ca}^2 + V_{ab}^2) - V_{bc}^2}; V_b = \frac{1}{3}\sqrt{2(V_{bc}^2 + V_{ab}^2) - V_{ca}^2}; V_c = \frac{1}{3}\sqrt{2(V_{bc}^2 + V_{ca}^2) - V_{ab}^2} \quad (5)$$

Aplicando la transformación de componentes simétricas, a los fasores de tensión al neutro calculados en (4) y (5), se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_0 \\ \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_b \\ \mathbf{V}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b e^{j\left(\frac{\alpha+\beta}{2}-\pi\right)} \\ V_c e^{j\left(\frac{\beta+\gamma}{2}-2\pi\right)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_1 e^{j\phi_1} \\ V_2 e^{j\phi_2} \end{bmatrix}; a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (6)$$

Para el análisis del comportamiento de la máquina de inducción alimentada con tensiones no sinusoidales se debe realizar una descomposición de la señal mediante la transformada de Fourier [10], el modelo armónico de la máquina se muestra en la figura 4. El cálculo del par eléctrico se realiza mediante superposición de los pares armónicos. Las armónicas pueden ser de secuencia negativa, positiva de acuerdo con la expresión [1]:

$$s_{h\pm} = \frac{h_{\pm}\omega_e - \omega_r}{h_{\pm}\omega_e} = \frac{h_{\pm} \mp (1-s_1)}{h_{\pm}}; \text{ donde: } \begin{cases} h_+ = 6m+1, & m=0,1,2,\dots \\ h_- = 6m-1, & m=1,2,\dots \end{cases} \quad (7)$$

$$T_e = \sum_{h=0}^n \pm T_{eh\pm} = T_1 - T_5 + T_7 - T_{11} + T_{13} - \dots \quad (8)$$

$$I_e = \sqrt{\sum_{h=1}^n I_{2h-1}^2} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + \dots} \quad (9)$$

Las armónicas múltiplos de tres son de secuencia cero, no magnetizan la máquina y por este motivo no producen par eléctrico. Afectan en la determinación de la corriente efectiva pero su modelo se representa solamente con la reactancia de dispersión y la resistencia del estator. En la figura 3(b) se muestra el modelo para todas las armónicas múltiplos de tres.

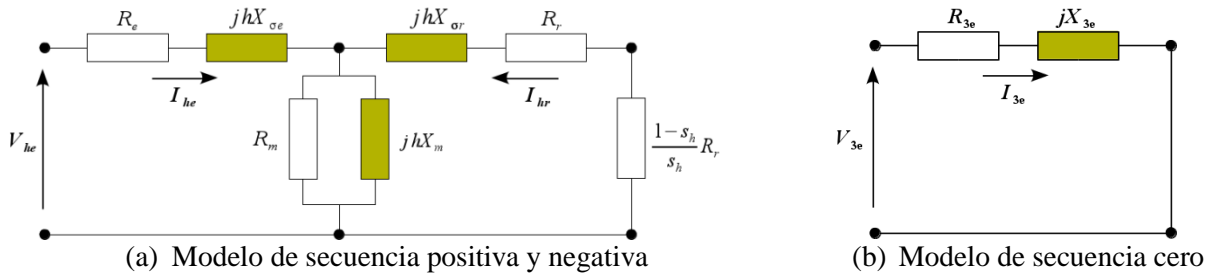


Fig. 4 Modelo armónico de la máquina de inducción

ESTIMACIÓN PARAMÉTRICA ITERATIVA

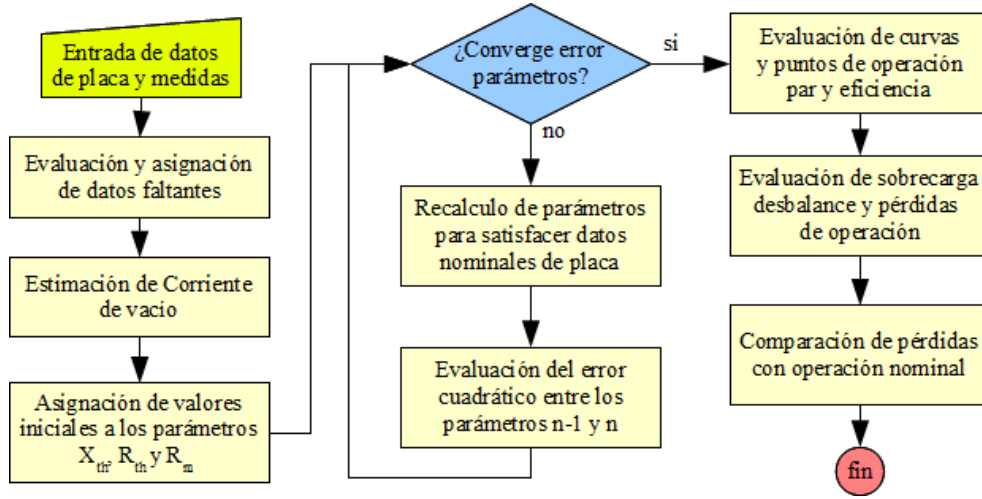


Fig. 5 Algoritmo para la estimación paramétrica iterativa y evaluación del motor

En la figura 5 se presenta el algoritmo que permite la estimación paramétrica iterativa. Se leen los datos de placa y las medidas realizadas en el estator de la máquina de inducción durante su operación. Con los datos de placa se realiza un cálculo inicial de parámetros tal como se desarrolló en la sección anterior. Utilizando un criterio de convergencia cuadrático de todos los errores entre los parámetros calculados en la iteración $n-1$ y la actual se decide si se continúa ajustando o se prosigue con la evaluación del modelo en el punto de operación medido. El cálculo de los parámetros para la iteración n se fundamenta en el ajuste de los datos de placa, específicamente pérdidas y factor de potencia nominal siguiendo esta secuencia de cálculos en valores adimensionales (pu):

$$\mathbf{V}_m(n) = 1 - (R_{th}(n-1) + jX_{th}(n-1))\mathbf{I}_n ; \mathbf{I}_0(n) = \frac{\mathbf{V}_m}{\mathbf{Z}_m} = \frac{\mathbf{V}_m(n)}{R_m(n-1) + jX_m} \quad (10)$$

$$\mathbf{I}_r(n) = \mathbf{I}_{ne} - \mathbf{I}_o(n) ; R_r(n) = \frac{T_n \cdot s_n}{|\mathbf{I}_r(n)|^2} ; R_{th}(n) = \frac{P_n - \frac{R_r}{s_n} |\mathbf{I}_r(n)|^2 - \frac{|\mathbf{V}_m(n)|^2}{R_m}}{|\mathbf{I}_{en}|^2} \quad (11)$$

$$Q(n) = \sqrt{1 - (fp_n)^2} - \frac{|\mathbf{V}_m(n)|^2}{X_m} ; X_{th}(n) \approx \frac{2Q(n)}{|\mathbf{I}_r(n)|^2 + |\mathbf{I}_{en}|^2} \quad (12)$$

$$P_{R_m}(n) = P_{per}(n) - R_{th}(n)|\mathbf{I}_{en}|^2 - R_r|\mathbf{I}_r(n)|^2 ; R_m(n) \approx \frac{|\mathbf{V}_m|^2}{P_{R_m}(n)} \quad (13)$$

El criterio de convergencia se establece con la siguiente condición de error cuadrático:

$$\varepsilon^2 = k_1 \left(\frac{X_{th}(n)}{X_{th}(n-1)} - 1 \right)^2 + k_2 \left(\frac{R_{th}(n)}{R_{th}(n-1)} - 1 \right)^2 + k_3 \left(\frac{R_m(n)}{R_m(n-1)} - 1 \right)^2 \quad (14)$$

donde k_1 , k_2 y k_3 son valores arbitrarios (para ajustar la precisión deseada para cada parámetro de (14).

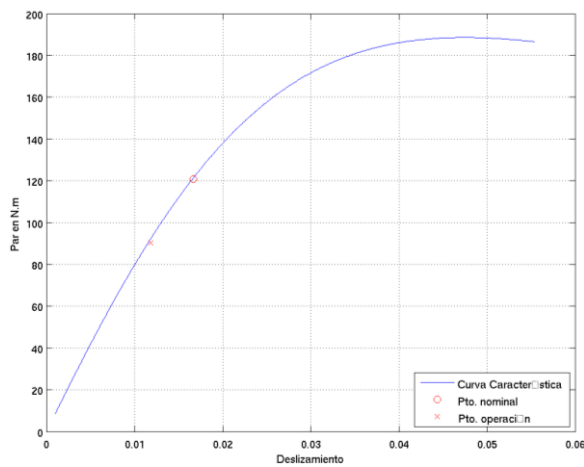
La convergencia se obtiene cuando $\varepsilon \leq \varepsilon_{\max} \approx 10^{-3}$. El resto del algoritmo utiliza los parámetros obtenidos para identificar las características operativas de la máquina, el punto de operación, pérdidas y comparaciones con el convertidor operando a valores nominales.

RESULTADOS OBTENIDOS

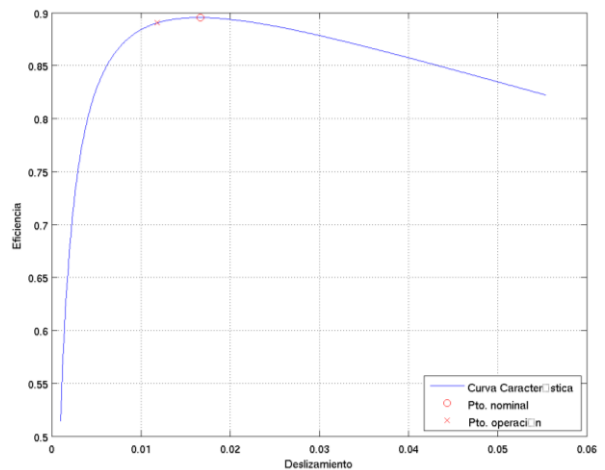
En la Tabla I se presentan los datos de placa y las medidas realizadas en una bomba de un sistema de enfriamiento de agua para un proceso industrial. En la figura 6(a) se muestra la característica par-deslizamiento de la máquina y en la figura 6(b) la característica del rendimiento de acuerdo con los parámetros del modelo. En ambas curvas se incluyen el punto nominal y el punto de operación. En la Tabla II se presentan los parámetros del motor, obtenidos después de 92 iteraciones, con un error máximo $\varepsilon_{\max} = 10^{-3}$.

Tabla I Datos de placa del motor y mediciones realizadas

	Tensión (V)			Corrientes (A)			Potencia	fp	N(rpm)
Punto Nominal	440			40			30 HP	0,82	1770
Medidas	432,8	438,7	435,3	28	31	31	16,8 kW	0,75	-



(a) Par-deslizamiento



(b) Eficiencia-deslizamiento

Fig. 6 Características de la máquina de inducción

Tabla II Parámetros estimados del modelo de la máquina de inducción en por unidad

R_{th}	R_r	R_m	X_{th}	X_m
0,0330	0,0167	19,12	0,3608	3,0

En la Tabla III se presentan los fasores de tensión al neutro y corriente de línea obtenidos de las medidas de valores eficaces de tensiones línea a línea y corrientes de línea cuando se aplican las expresiones (4) y (5).

Tabla III Cálculo de los desequilibrios de tensión y corriente

	Fase a	Fase b	Fase c	Sec. 1	Sec. 2	desbalance
Tensiones (V)	249,7 $\angle 0^\circ$	251,6 $\angle -119,7^\circ$	253,1 $\angle -239,6^\circ$	251,5	1,21	0,48%
Corrientes (A)	28 $\angle -41,3^\circ$	31 $\angle -158,2^\circ$	31 $\angle -284,4^\circ$	29,97	1,95	6,52%

En la Tabla IV se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del motor en base al modelo obtenido y las medidas realizadas en el punto de operación. El algoritmo estima la velocidad de operación,

la carga mecánica en el eje, el rendimiento del punto de operación y las pérdidas en la máquina. También se determina el incremento ΔP_{per} en las pérdidas con respecto a la operación nominal, que es un indicador energético de los posibles ahorros si se corrigen los problemas de calidad de servicio o niveles de carga de los motores.

Tabla IV Resultados obtenidos del modelo

n_{op} (rpm)	Carga (%)	η_{op} (%)	P_{per} (W)	ΔP_{per} (W)
1778	75,15	86,53	2.262,8	296,3

CONCLUSIONES

La metodología propuesta permite evaluar el punto de operación de un motor de inducción en línea, mediante las medidas de las variables eléctricas (tensiones efectivas de línea a línea, corrientes efectivas de línea y potencia trifásica) y los datos de placa (tensión, corriente, factor de potencia, eficiencia, velocidad y potencia de salida). El sistema calcula desbalances de tensión y corriente, los parámetros del circuito equivalente y determina la condición de carga, rendimiento, velocidad y pérdidas del convertidor. Con registros instantáneos de tensiones y corrientes es posible extender las posibilidades de evaluación al cálculo de armónicas y sus efectos en las pérdidas en el motor. También puede comparar el punto de operación con el de una máquina que opere en valores nominales para identificar posibles ahorros al corregir problemas de calidad de servicio o en la carga mecánica. La instrumentación necesaria es muy simple y el sistema puede ser automatizado con un sistema de adquisición de datos para realizar evaluaciones masivas en plantas industriales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J.M. Aller “Máquinas Eléctricas Rotativas” (Editorial Equinccio, 2008)
- [2] P.C. Krause, O. Wasynczuk and S.D. Sudhoff “Analysis of electric machinery and drive system” (IEEE Press, 2002)
- [3] White & Woodson “Electromechanical energy conversion” (John Willey & Sons, 1958)
- [4] P. Vas, Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines, , 1993. :Clarendon Press
- [5] A. Bellini A. De Carli, M. La Cava “Parameter Identification for Induction Motor Simulation” (Automática, Vol. 12, pp. 383-386, 1976)
- [6] C. Moons, B. De Moor “Parameter Identification of Induction Motor Drives” (Automática, Vol. 31, Nº 8. pp. 1137 - 1147. 1995)
- [7] H.A. Toliyat, E. Levi, M.Raina, “A review of RFO induction motor parameter estimation techniques” (Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.18, no.2, pp. 271- 283, June 2003)
- [8] I. Boldea and S.A. nasar “The Induction Machine Handbook” (CRC, 2002)
- [9] Y. Déplanche, “Diccio fórmulas” (Edunsa, 1996)
- [10] E.O. Brigham “The fast Fourier transform and its applications” (Prentice Hall, 1988)