

**A1 – Máquinas eléctricas rotativas****ENSAYO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN DE ALTA EFICIENCIA PARA VALIDACIÓN DE LOS PARÁMETROS OBTENIDOS POR UN MÉTODO ANALÍTICO ITERATIVO**

D. M. FERREYRA
CIDEME, UTN San Francisco
Argentina

dferreyra@sanfrancisco.utn.edu.ar

C. M. PEZZANI
GEA–IITEMA, UNRC-CONICET
Argentina

cpezzani@ing.unrc.edu.ar

A. J. DÍAZ
CIDEME, UTN San Francisco
Argentina

albertojavierdiaz@gmail.com

P. D. DONOLO*
GEA–IITEMA, UNRC-CONICET
Argentina

pdonolo@ing.unrc.edu.ar

***Resumen** – Para los motores de inducción, está extendido el uso de un circuito equivalente por fase, similar al de los transformadores, que permite simular su funcionamiento a diferentes estados de carga. Para determinar de manera precisa los parámetros de este circuito, se deben realizar diversos ensayos sobre el motor, que incluyen su acoplamiento a un dinamómetro y su estabilización térmica a potencia nominal. Como alternativa analítica más económica y de resultados aceptables, se han desarrollado numerosos métodos para estimar dichos parámetros a partir de los datos operativos proporcionados por el fabricante de la máquina. En este trabajo, se aplica uno de estos métodos para obtener los parámetros del circuito equivalente de un motor de inducción de 132 kW, IV polos, 380/660 V, 50 Hz, clase de eficiencia IE3. Los resultados calculados con la aplicación del circuito equivalente así obtenido se contrastan con los datos medidos en un ensayo real efectuado sobre el motor acoplado al dinamómetro. Los resultados muestran diferencias mínimas entre los resultados del modelo y los experimentales.*

***Palabras clave:** motor de inducción de alta eficiencia – parámetros de circuito equivalente – ensayo de carga – determinación de eficiencia*

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas accionados con motores eléctricos son los principales consumidores de la energía eléctrica a nivel global. Según el reporte de la *International Energy Agency* (IEA), aproximadamente el 53% de la demanda global de electricidad corresponde a sistemas accionados con motores eléctricos [1]. Esta significativa participación en la demanda conduce a que, incluso pequeños incrementos en el rendimiento, puedan conducir a grandes ahorros de energía a nivel global. Además, si consideramos que aproximadamente el 67% de la energía eléctrica mundial se produce mediante combustibles fósiles, las mejoras en el rendimiento de los sistemas accionados con motores eléctricos conllevan a una importante reducción en las emisiones de gases efecto invernadero (principalmente dióxido de Carbono, CO₂) [2][3].

Una herramienta de utilidad para estimar los ahorros potenciales en aplicaciones con motores eléctricos es la utilización de modelos matemáticos. A partir del conocimiento de las condiciones de operación de un determinado motor, se puede conocer a partir del modelo el rendimiento del mismo y las mejoras que se podrían obtener al utilizar un motor con una clase de eficiencia superior [4].

En este sentido, existen diversos modelos del motor eléctrico aceptados en la bibliografía para estimar su comportamiento en diferentes condiciones de operación. Se han desarrollado modelos con

* Ruta Nacional 36, km 601, Río Cuarto (Córdoba), Argentina – pdonolo@ing.unrc.edu.ar

diferentes grados de complejidad en régimen transitorio y permanente para analizar el comportamiento con diferentes cargas, condiciones de alimentación, o que permiten la inclusión de averías en el motor entre otras [5][6][7]. En general todos presentan buenos resultados, sin embargo, se pueden presentar algunos desafíos para obtener los parámetros de estos modelos, principalmente en aquellos enfoques más complejos que implican el conocimiento de datos de fabricación como dimensiones y materiales. En este contexto, si bien el modelo en régimen permanente proporciona un nivel de representación limitado, resulta de gran utilidad para derivar estrategias para mejorar la eficiencia energética en motores. Este tipo de modelo requiere de pocos parámetros para los cuáles existen ensayos normalizados que permiten obtenerlos.

Para el modelo en régimen permanente todos los parámetros de este modelo podrían obtenerse con los ensayos de vacío y de rotor bloqueado del motor, de manera similar a la aplicada en transformadores con los ensayos de vacío y de cortocircuito [7]. La complejidad de implementación de estos ensayos depende principalmente de la potencia nominal del motor, ya que de esta depende la envergadura del banco de ensayos necesario para realizar las pruebas. Incluso disponiendo del banco de laboratorio, los resultados de los modelos con los parámetros obtenidos a partir de dichos ensayos presentan divergencias con respecto a los resultados esperables de funcionamiento del motor. Tales resultados esperables pueden ser los proporcionados por el fabricante o los verificados por medio de un ensayo del motor en diversos estados de carga [8].

Una alternativa para determinar los parámetros es la aplicación de un método iterativo usando como base solamente los datos de desempeño garantizados que proporciona el fabricante. En [9], se muestra un ejemplo de este tipo de determinaciones, fundamentalmente basado en una implementación del método iterativo presentado en [10]. En particular, en [9] se analizan de manera comparativa los parámetros obtenidos para el modelo de diversos motores de inducción de alta eficiencia.

En el presente trabajo, en primer lugar, se aplica el método iterativo propuesto en [10] a fin de obtener todos los parámetros del modelo de régimen permanente, empleando como entrada los datos garantizados por el fabricante para un motor de inducción trifásico (MI) de 132 kW, IV polos y clase de eficiencia IE3. En segundo lugar, mediante simulaciones realizadas con el modelo, se representan las situaciones normalizadas de plena carga (100 % de carga), cargas parciales (25 % de carga, 50 % de carga y 75 % de carga) y sobrecarga (125 % de carga). Finalmente, se comparan los resultados arrojados por el modelo con las mediciones realizadas sobre el motor en un ensayo con un dinamómetro hidrodinámico, según las condiciones especificadas en [11].

2 MODELO EN RÉGIMEN PERMANENTE DEL MI

Para el motor de inducción (de jaula de ardilla) trifásico, existe un consenso generalizado sobre el modelo de circuito equivalente monofásico que permite conocer su funcionamiento en régimen permanente para diversos estados de carga. Una variante de este modelo, que incluye las pérdidas en el núcleo, se muestra en la Fig. 1. Este modelo permite calcular diversas magnitudes eléctricas, como corrientes, pérdidas y caídas de tensión internas de la máquina a las que no se tiene acceso de manera directa con las mediciones que se realizan a bornes del motor. Este modelo es una simplificación en régimen permanente del modelo dinámico en variables $qd0$ para las máquinas eléctricas rotantes de inducción [5].

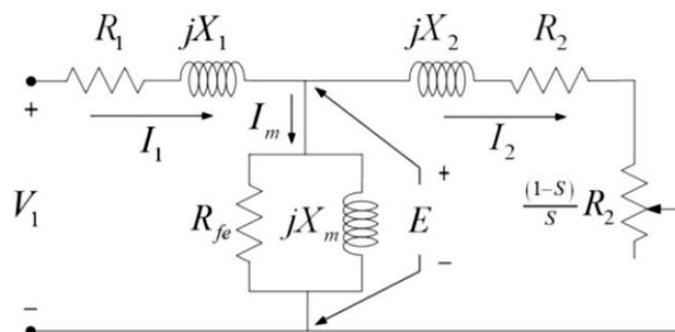


Fig. 1. Circuito equivalente monofásico de motores de inducción

A continuación, se detalla cada una de las variables y parámetros del circuito equivalente presentado en la Fig.1.

- V_f : tensión de fase
- I_1 : corriente de fase en el estator (primario)
- I_2 : corriente de fase en el rotor (secundario, adaptado a un equivalente trifásico), reducida al estator
- I_m : corriente de vacío (por la rama derivada)
- E : tensión de magnetización (fuerza contraelectromotriz en el estator, fuerza electromotriz en el rotor)
- s : deslizamiento
- R_1 : resistencia óhmica de una fase del estator
- X_1 : reactancia de dispersión de una fase del estator
- R_2 : resistencia óhmica de una fase del rotor (adaptado a un equivalente trifásico), reducida al estator
- X_2 : reactancia de dispersión de una fase del rotor (adaptado a un equivalente trifásico), reducida al estator
- R_{fe} : resistencia representativa de las pérdidas disipadas en el circuito magnético (valor por fase)
- X_m : reactancia representativa del camino de la corriente de magnetización (valor por fase)
- $R_2 \cdot (1 - s) / s$: resistencia de carga equivalente, representativa de la potencia convertida de eléctrica a mecánica en el rotor

3 OBTENCIÓN DE PARÁMETROS A PARTIR DE LOS DATOS NOMINALES

La correcta determinación de los parámetros del modelo determina la precisión de la representación que proporciona el modelo. Es por esto que existen diversos métodos para la obtención de los parámetros. En particular, la obtención “fuera de línea” de los parámetros de este modelo resulta de gran importancia en aquellas aplicaciones donde el motor está operando en línea, o cuando realizar los ensayos necesarios no es posible [6]. Para la obtención de los parámetros del modelo se aplicó el método analítico utilizado en [9] empleando como datos de entrada los datos garantizados de un motor de inducción trifásico de 132 kW, IV polos y clase de eficiencia IE3, cuyos datos nominales principales se detallan en la Tabla I.

TABLA I. DATOS NOMINALES PRINCIPALES DEL MOTOR ADOPTADO

| Motor trifásico de inducción de jaula con clase de eficiencia IE3 | | | |
|--|------------------------|------------------------------|--------------|
| Potencia nominal | 132 kW | Tensión nominal | 380/660 V |
| Velocidad nominal | 1490 min ⁻¹ | Corriente nominal | 243/140 A |
| Carcasa | 315S/M | Frecuencia nominal | 50 Hz |
| Par de arranque | 250 % | Corriente de arranque | 7,5 p. u. |
| Servicio/FS | S1/1,00 | Clase de aislación | F |
| Estado de carga | 50 % | 75 % | 100 % |
| Factor de potencia | 0,74 | 0,82 | 0,86 |
| Eficiencia | 95,1 % | 95,7 % | 95,8 % |

El método analítico de estimación de parámetros puede resumirse en los pasos y operaciones descriptas a continuación [9]:

- A) Obtención de R_1 por regresión lineal a partir de los datos proporcionados por el fabricante para los tres estados de carga habituales (50 %, 75 % y 100 %), especialmente la eficiencia y el factor de potencia. El deslizamiento en cada estado de carga puede estimarse linealmente a partir del deslizamiento a carga nominal. Este paso implica el cálculo de la corriente consumida por el motor en cada uno de los tres estados de carga.

- B) Estimación de P_{fe} (pérdidas en el circuito magnético) y de P_{fv} (pérdidas mecánicas por fricción y ventilación) como una proporción fija de las pérdidas totales a potencia nominal. Este es un paso intermedio.
- C) Obtención de R_2 con un sistema de ecuaciones basado en los datos proporcionados por el fabricante para dos estados de carga (por lo general, 75 % y 100 %) y que aprovecha los valores de obtenidos en el primer paso.
- D) Cálculo iterativo de X_1 , X_2 , R_{fe} y X_m a partir de los datos obtenidos anteriormente.

A continuación, se detallan los parámetros obtenidos con la aplicación de este método analítico a los datos de la Tabla I:

| R_1 | R_2 | X_1 (L_1) | X_2 (L_2) | R_{fe} | X_m (L_m) |
|-----------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------|-------------------------------|
| 0,0160 Ω | 0,0063 Ω | 0,0623 Ω (0,1983 mH) | 0,0623 Ω (0,1983 mH) | 72,58 Ω | 2,5601 Ω (8,149 mH) |

4 REALIZACIÓN DE ENSAYO AL DINAMÓMETRO

Para contrastar los resultados de simulación se obtuvieron mediante ensayos de laboratorio valores de corrientes, tensiones, velocidad, par y potencias para el MI bajo estudio en diferentes condiciones de operación. Los ensayos con carga realizados sobre el MI se concretaron con la máquina estabilizada en temperatura y según las condiciones estipuladas en [11], es decir, en la modalidad de ensayo de tipo. Por lo tanto, los resultados obtenidos son comparables con los datos garantizados por el fabricante. Para expresar los valores de eficiencia, se adoptaron 4 dígitos significativos y su cálculo se realizó de manera directa, como el cociente de la potencia mecánica de salida por la potencia activa eléctrica de entrada.

Los ensayos con carga se realizaron aplicando un par resistente en el eje del motor por medio de un dinamómetro hidrodinámico. El relevamiento de todos los datos mecánicos y eléctricos del ensayo se concentran en una PC de recopilación de datos donde se muestrean y, una vez estabilizados los valores en un estado de carga dado, se capturan todos simultáneamente [8]. En la Fig. 2, se muestra un ejemplo en el que esta disposición permite la realización de ensayos con supervisión de inspectores externos conectados de manera remota [13].

En la Tabla II, se detallan los resultados principales obtenidos del ensayo realizado luego de la estabilización térmica de la máquina. Por limitaciones propias del principio de funcionamiento del sistema que aplica el par resistente al motor, la potencia real solicitada en el eje puede tener un error máximo de ± 0.5 % respecto de lo indicado.

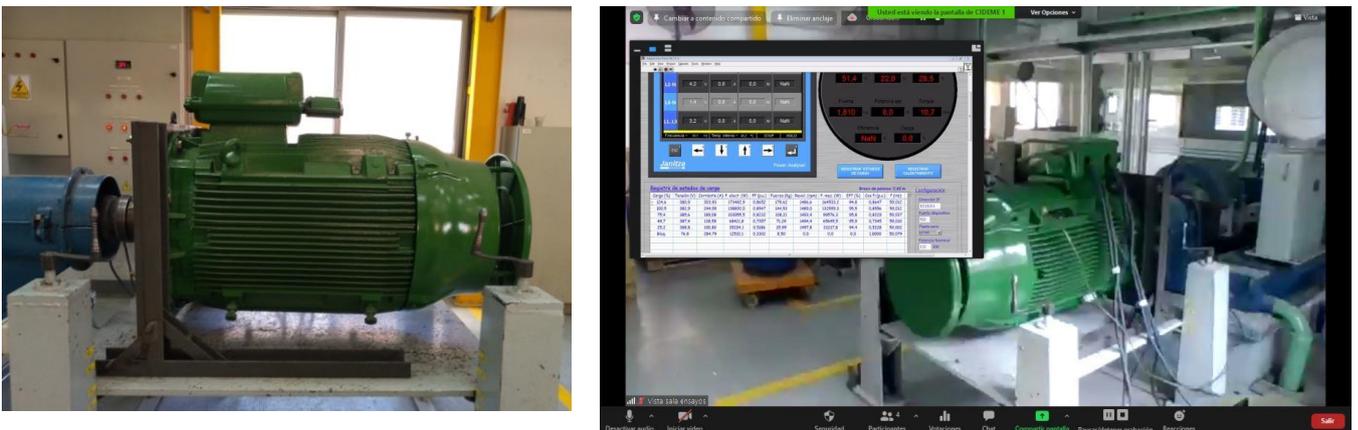


Fig. 2. Disposición para la lectura en línea de los valores de ensayo del motor adoptado

TABLA II. RESULTADOS PRINCIPALES DEL ENSAYO DEL MOTOR EN EL DINAMÓMETRO

| Magnitud (valores promedio) | Und. | Estado de carga | | | | | | |
|--------------------------------|-------------------|-----------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|--------------------|
| | | Vacío | 25 % | 50 % | 75 % | 100 % | 125 % | Rotor bloqueado |
| Tensión de línea | V | 380,5 | 386,9 | 385,2 | 383,2 | 381,0 | 379,0 | 380,0 |
| Corriente de línea | A | 76,64 | 100,25 | 138,86 | 189,32 | 244,77 | 305,48 | 1407,6 |
| Potencia eléctrica total | W | 1856,4 | 36 042,2 | 68 922,1 | 103 904,5 | 138 406,5 | 173 709,1 | 306 192,8 |
| Factor de potencia | - | 0,0368 | 0,5365 | 0,7439 | 0,8269 | 0,8570 | 0,8661 | 0,3305 |
| Par | N·m | 0 | 215,9 | 422,5 | 637,9 | 849,8 | 1061 | 1234 |
| Velocidad | min ⁻¹ | ~ 1500 | 1498,6 | 1494,6 | 1490,4 | 1489,6 | 1487,0 | 0 |
| Potencia mecánica | W | 0 | 33 888,5 | 66 118,7 | 99 560,0 | 132 557,0 | 165 225,4 | 0 |
| Eficiencia | % | - | 94,02 | 95,93 | 95,82 | 95,77 | 95,12 | - |

5 SIMULACIÓN CON EL MODELO DE RÉGIMEN PERMANENTE

Para comparar el desempeño del modelo de régimen permanente con los parámetros obtenidos en la sección 3 se realizaron simulaciones para las mismas condiciones evaluadas en los ensayos de laboratorio. Para la simulación se emplearon los mismos valores para la tensión de fase que los relevados en los ensayos experimentales. Por otro lado se ajustó la resistencia equivalente de carga $R_{carga} = R_2 (1 - s) / s$ para cada simulación de modo tal que la potencia de salida calculada con el modelo coincidiera con la relevada durante los ensayos. Luego a partir del valor de $R_2 (1 - s) / s$ se calculó el deslizamiento y la velocidad. A fin de obtener el valor preciso de $R_2 (1 - s) / s$ para cada estado de carga, se realizó un cálculo iterativo por medio de [14] a partir de la potencia mecánica de ensayo y de la tensión nominal aplicada en cada caso. Los valores de tensión y resistencia equivalente de carga empleada en cada caso se presentan en la tabla III.

Con los valores ajustados para la tensión de alimentación y resistencia equivalente de rotor, se simularon las mismas condiciones ensayadas en el laboratorio, desde vacío hasta 125 % de carga. En la Fig. 3, se muestra la implementación [15] en simulación del circuito equivalente para el caso de 100 % de carga.

TABLA III. VALORES DE V_1 Y R_{carga} PARA SIMULACIÓN

| | V_1 (V) | $R_2 \cdot (1 - s) / s$ (Ω) |
|---|-----------|--------------------------------------|
| Estado 25 % (ensayo con 33888,5 W en el eje) | 223,38 | 4,1610 |
| Estado 50 % (ensayo con 66118,7 W en el eje) | 222,40 | 2,0872 |
| Estado 75 % (ensayo con 99560,0 W en el eje) | 221,24 | 1,3502 |
| Estado 100 % (ensayo con 132557,0 W en el eje) | 219,97 | 0,9841 |
| Estado 125 % (ensayo con 165 225,4 W en el eje) | 218,82 | 0,7646 |

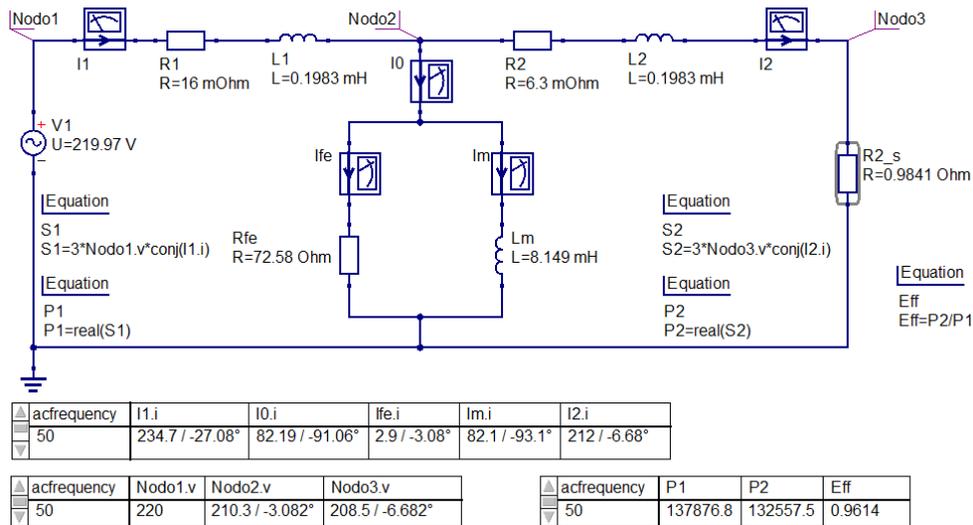


Fig. 3. Simulación del circuito equivalente del motor al 100 % de carga según la potencia mecánica de ensayo

Para evaluar la representatividad de la simulación realizada, se comparan los resultados obtenidos con el circuito equivalente con los datos obtenidos experimentalmente. En las figuras 4 a 7 se comparan para cada estado de carga, la corriente, el factor de potencia, el deslizamiento y la eficiencia del motor. En la parte (a) de cada figura se comparan los valores en (pu) arrojados por el modelo con los relevados experimentalmente, mientras que en la parte (b) de la figura se presenta el error expresado en porcentaje del valor experimental.

Analizando la figura 4, se observa que para los casos de mayor estado de carga el modelo sobrestima los valores de corriente, obteniendo el mayor error para el caso en vacío 9% mientras que para el caso de carga nominal el error es del 4.1 %.

En cuanto al factor de potencia se puede observar que en todos los casos el modelo arroja valores de mayores que los encontrados experimentalmente, siendo el máximo error de alrededor del 10% mientras que para el caso de carga nominal es de 3.9%. De la figura 6 se puede observar que el deslizamiento calculado con el modelo es la variable que presenta mayor error, siendo la máxima desviación 62% para el caso del 25% de carga y la mínima de 5.7% para 125% de carga. En este caso, puede resultar más adecuado comparar las velocidades que presentan un menor error porcentual.

Finalmente, al analizar la eficiencia, figura 7, se puede observar que el modelo arroja resultados aceptables, con un error máximo menor al 1 % en todos los puntos analizados. En particular para el caso de 100% de carga el error es del 0.34%. Otra manera de expresar esto mismo es que las pérdidas totales calculadas para este estado de carga son 4,01 % de la potencia de salida, cuando esta proporción en el ensayo fue del 4,42 %.

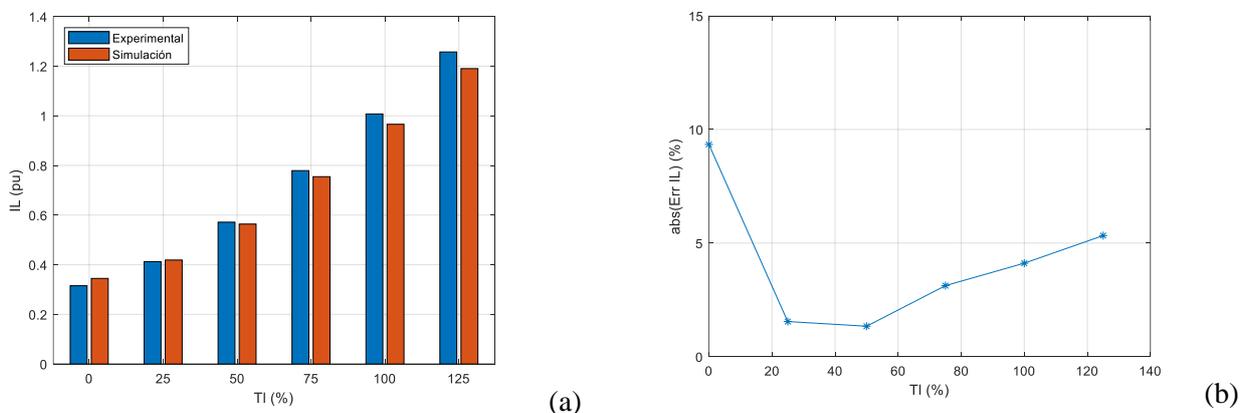
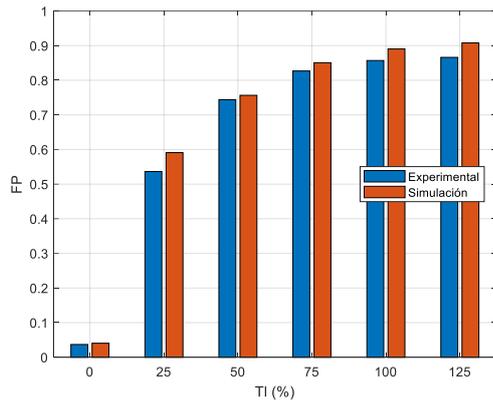
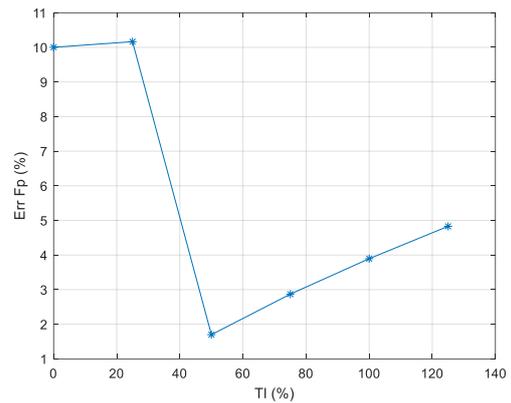


Fig. 4. Corriente de línea experimental y simulación. a) valores en pu. b) error en IL

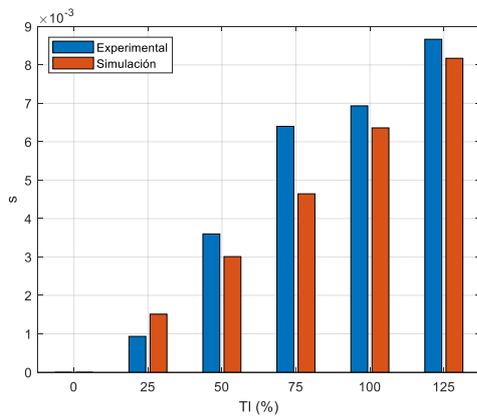


(a)

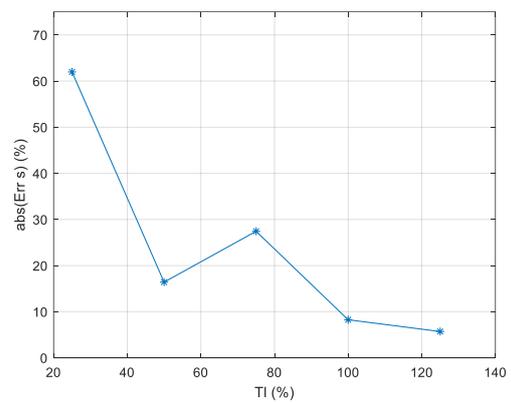


(b)

Fig. 5. Factor de potencia experimental y simulación. a) valores en pu. b) error en Fp

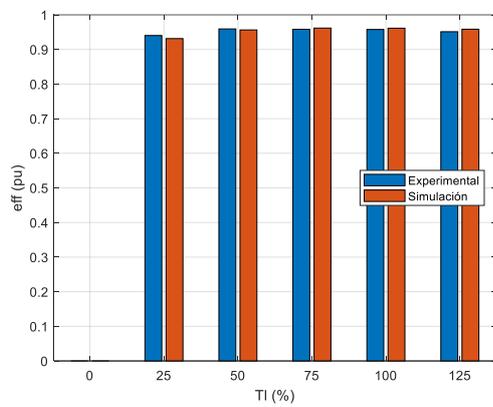


(a)

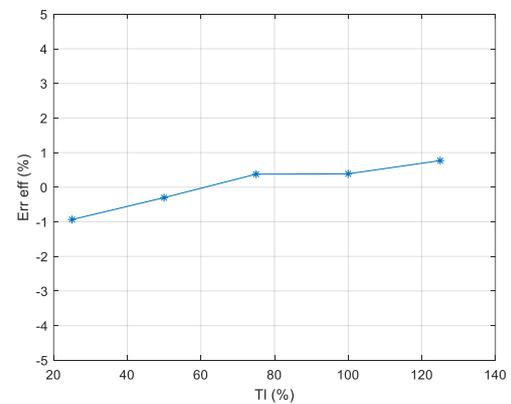


(b)

Fig. 6. Deslizamiento experimental y simulación. a) valores en pu. b) error en s



(a)



(b)

Fig. 7. Eficiencia experimental y simulación. a) valores en pu. b) error en Eff

6 CONCLUSIONES

En este trabajo, se aplicó un método analítico que emplea los datos proporcionados por el fabricante para la estimación de los parámetros del circuito equivalente por fase de un motor de inducción de 132 kW, IV polos, 380/660 V, 50 Hz, clase de eficiencia IE3. Con el circuito equivalente así obtenido, se simularon diversos estados de carga de dicho motor y se compararon los resultados de simulación con los datos de un ensayo real realizado sobre esta máquina acoplada al dinamómetro y estabilizada en temperatura. Las comparaciones favorables obtenidas demuestran que el método analítico propuesto proporciona resultados bastante representativos de la realidad del motor de inducción adoptado. A futuro, puede ampliarse dicha validación a detalles adicionales, como apartamientos de la frecuencia respecto del valor nominal, la alimentación con tensiones notoriamente desequilibradas o la presencia de contaminación armónica ostensible en la red de alimentación.

7 AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Programa de Investigación y Desarrollo ENECBSF0008115 homologado por el Rectorado de UTN y por la UNRC. Los autores desean agradecer a la empresa WEG Equipamientos Eléctricos SA por permitir el uso de los datos de ensayo obtenidos por el grupo de I+D CIDEME, de la Facultad Regional San Francisco de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), preservando todos los recaudos de confidencialidad.

8 REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook 2016. November 2016. [En línea]. Disponible en: <https://webstore.iea.org/world-energy-outlook-2016>.
- [2] A. Almeida, et al., “Policy options to promote energy efficient electric motors and drives in the EU”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 74, pp 1275-1286, 2017.
- [3] IEA, International Energy Agency. “Key World Energy Statistics 2015”, Edited by OCDE/IEA, Paris, France, November 2015.
- [4] P. D. Donolo, E. Chiacchiera, C. M. Pezzani, A. S. Lifschitz, and C. H. De Angelo. “Economic Barriers to the Application of Energy Efficient Motors in Industry,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 10, pp. 1817–1825. 2021. Retrieved from <https://latam.ieee9.org/index.php/transactions/article/view/3666>.
- [5] P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, and S. D. Pekarek. Analysis of electric machinery and drive systems. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013.
- [6] H.A. Toliyat, E. Levi, and M. Raina, “A Review of RFO Induction Motor Parameter Estimation Techniques,” *IEEE Trans. on Energy conversion*, vol. 18, no. 2, pp. 271-283, 2003.
- [7] J. Pyrhonen, T. Jokinen and V. Hrabovcova, Design of Rotating Electrical Machines, NJ, Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
- [8] O. D. Gallo, “Convenio Universidad-Empresa. Grupo CIDEME. Servicios, investigación y formación de estudiantes tecnológicos,” [edutecne.utn.edu.ar](http://www.edutecne.utn.edu.ar), 2017. [En línea]. Disponible: http://www.edutecne.utn.edu.ar/monografias/CIDEME_2017.pdf [Acceso: 30 de mayo de 2022].
- [9] F. Y. Poy, A. A. Radosta, P. D. Donolo, y C. M. Pezzani, “Variación paramétrica en el modelo de motores de inducción de distintas clases de eficiencia”, V Congreso Bienal de la Sección Argentina del IEEE, IEEE ARGENCON 2020, Resistencia, Chaco, 2020.
- [10] C. A. C. Wengerkievicz, R. de A. Elias, N. J. Batistela, N. Sadowski, P. Kuo-Peng, S. C. Lima, P. A. da Silva, and A. Y. Beltrame. “Estimation of three-phase induction motor equivalent circuit parameters from manufacturer catalog data,” *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 16, 90-107, 2017.
- [11] Máquinas eléctricas rotativas. Parte 1: Características asignadas y características de funcionamiento, Norma UNE-EN 60034-1:2011.
- [12] O. D. Gallo, D. M. Ferreyra, y A. J. Díaz, “Potencial de ahorro energético con motores de alta eficiencia en industrias procesadoras de granos,” V Congreso Bienal de la Sección Argentina del IEEE, IEEE ARGENCON 2020, Resistencia, Chaco, 2020.
- [13] D. M. Ferreyra, A. J. Díaz, S. F. Leurino, y G. J. Buratto, “Inspecciones en modalidad remota de ensayos sobre motores eléctricos durante la pandemia de COVID-19.” V Congreso Argentino de Ingeniería, CADI 2021, Buenos Aires, 2021.
- [14] GitHub, Inc., Octave Online · Cloud IDE compatible con MATLAB (2022). [En línea]. Disponible: <https://octave-online.net/> [Acceso: 30 de mayo de 2022].
- [15] GitHub, Inc., GitHub - Qucs/qucs: Qucs project official mirror (2021). [En línea]. Disponible: <https://github.com/Qucs/qucs> [Acceso: 30 de mayo de 2022].