

Selection of Induction Machine Models for Efficiency Evaluation in Electric Vehicles

F. Aguilera, *Student Member*, IEEE, P. M. de la Barrera, *Member*, IEEE and C. H. De Angelo, *Senior Member*, IEEE

Abstract— Different induction machine (IM) models are evaluated, with the aim to determine its usefulness in efficiency studies for electric vehicles (EV) traction drives. In particular, two simple IM models proposed in the literature, which take into account the additional losses, are compared. With this aim, model parameters are adjusted from experimental tests performed on a 4 kW IM. Then, results obtained from both models at different operating points are compared. Even when the estimation errors are similar when using both models, one of them is chosen because of its simplicity. Finally, a simple application of this model is proposed, which consists in use the model for obtaining a complete efficiency map of the IM, without need further essays. Such efficiency map can be used to evaluate the overall efficiency of the traction drive of an EV, or in EV design.

Keywords— Induction Machine, Models, Losses, Electric Vehicle, Efficiency Maps.

I. INTRODUCCIÓN

UNO DE los desafíos más importantes en el diseño de vehículos eléctricos (VE) es optimizar el rendimiento, debido a su capacidad limitada de almacenamiento de energía. En etapas de diseño, suelen realizarse simulaciones para hacer una estimación del consumo de energía del vehículo [1, 2]. El motor eléctrico es uno de los componentes más importantes que deben considerarse para la evaluación del rendimiento de los accionamientos utilizados para tracción. En este sentido, las máquinas de inducción (MI) son usualmente utilizadas en accionamientos para tracción de VE [3].

Para estimar el rendimiento de una MI, una opción es utilizar los mapas de rendimiento (MR) (también llamados contornos de rendimiento), en donde se representa la eficiencia energética en función del par producido y de la velocidad [4]. Para conformar los MR, normalmente se necesita de una gran cantidad de ensayos a fin de representar las mediciones del rendimiento en los posibles puntos de operación [5].

Otra forma de estimar el rendimiento de las MI es utilizar un modelo, reduciendo significativamente la cantidad de ensayos necesarios. En la literatura pueden encontrarse algunos estudios sobre la evaluación del rendimiento de VE/VE híbridos (VEH) a partir de modelos [1, 2, 6, 7]. Estos trabajos consideran las pérdidas dinámicas en diferentes componentes del vehículo, incluyendo el motor eléctrico. Sin embargo, los estudios citados utilizan el modelo tradicional de la MI, el cual sólo considera las pérdidas I^2R de estátor y de rotor. Si bien

éstas pérdidas son las más importantes, para una mejor estimación usualmente es necesario considerar todas las pérdidas, es decir: las pérdidas en el núcleo y las pérdidas adicionales (PA) [8]. En este sentido, las PA han tenido un escaso tratamiento en la literatura relacionada con modelos simples de MI [9-11], en los cuales sea posible determinar sus parámetros a partir de ensayos.

Además, a partir de un modelo adecuado, es posible construir mapas de rendimiento precisos de las MI para diferentes estrategias de control, los cuales son utilizados para optimizar flujos de energía en VEH [2, 12], dimensionar sistemas de transmisión [13] o para simplificar la evaluación del consumo en un ciclo de manejo [4, 14].

Por otra parte, debido a que en un VE el accionamiento se encuentra interconectado a otros elementos (por ejemplo: inversor y transmisión mecánica), el modelo de MI utilizado debe mantener válidas también el resto de las variables de entrada y salida, lo cual no es considerado en otros trabajos [15]. Es por esto que en el presente trabajo se realiza una comparación de los modelos simples de MI presentes en la literatura que consideran sus pérdidas, con el fin de ser utilizados en la estimación del consumo eléctrico de un VE. Para ello, se definen las características que debe tener un modelo para esta aplicación. En función de esto, se seleccionan dos modelos que cumplen con estos requisitos y se describen los métodos utilizados para determinar sus parámetros. Luego, se analiza el error de estimación, no sólo de la potencia de entrada y de salida, sino también de la corriente de fase y el par producido, para diferentes puntos de operación. Con ello es posible evaluar su precisión tanto en la determinación del consumo eléctrico como en las variables de interconexión con otros elementos. Finalmente, se describe una aplicación de los modelos, en la cual se construye un MR que muestra el rendimiento en función de la velocidad y el par de una MI.

El resto del trabajo se organiza de la siguiente manera: en la Sección II se presenta una descripción de los tipos de pérdidas presentes en las MI. En la Sección III se discuten los modelos seleccionados de MI. Luego, en la Sección IV se explican los métodos utilizados para obtener los parámetros a partir de ensayos convencionales. En la Sección V se comparan resultados experimentales con valores calculados a partir de los modelos. Finalmente, en la Sección VI se describe la construcción de un mapa de rendimiento utilizando uno de los modelos.

II. RENDIMIENTO DE MÁQUINAS DE INDUCCIÓN

El rendimiento de una MI puede expresarse como [16]:

F. Aguilera, Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, Argentina, afacu@ieee.org

P. M. de la Barrera, Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, Argentina, pbarrera@ieee.org

C. H. De Angelo, Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, Argentina, cdeangelo@ieee.org

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} = \frac{P_e - P_{LT}}{P_e} \quad (1)$$

donde P_e es la potencia eléctrica total de entrada en la máquina, P_m es la potencia mecánica de salida en el eje del motor y P_{LT} es la potencia total de pérdidas. Las pérdidas pueden separarse en las siguientes componentes:

$$P_{LT} = P_{Lsir} + P_{Lrir} + P_{Lh} + P_{Lsl} + P_{Lm} \quad (2)$$

donde P_{Lsir} y P_{Lrir} son las pérdidas I^2R del estator y del rotor, respectivamente; P_{Lh} son las pérdidas totales en el núcleo, P_{Lsl} son las pérdidas adicionales y P_{Lm} son las pérdidas mecánicas. Se resumen a continuación los procedimientos para determinar estas pérdidas en una MI según lo especificado en [16].

Las pérdidas I^2R en el estator pueden calcularse como

$$P_{Lsir} = 3R_s I_s^2 \quad (3)$$

donde R_s y I_s son la resistencia y la corriente eficaz por fase del estator, respectivamente. Las pérdidas I^2R en el rotor se obtienen usando la siguiente expresión

$$P_{Lrir} = (P_e - P_{Lsir} - P_{Lh})s \quad (4)$$

donde s es el deslizamiento en p.u.

Las pérdidas en el núcleo pueden calcularse como

$$P_{Lh} = P_{e,0} - P_{Lsl} - P_{Lm} \quad (5)$$

Donde $P_{e,0}$ es la potencia eléctrica en vacío. Éstas pérdidas pueden modelarse como una resistencia equivalente en paralelo con la rama de magnetización en el circuito eléctrico equivalente de la MI [16].

Las pérdidas mecánicas están compuestas por las pérdidas por fricción y por la resistencia del aire. Pueden estimarse utilizando la curva $(P_{e,0} - P_{Lsir})$ vs. tensión de alimentación. De la intersección de esta última curva con el eje de tensión igual a cero resultan las pérdidas mecánicas.

Las PA pueden estimarse de manera indirecta en todo el rango de carga a partir de ensayos en los seis niveles de carga: 25 %, 50 %, 75 %, 100 %, 125 % y 150 % del valor nominal. En cada nivel de carga, las PA se obtienen como

$$P_{Lsl} = P_{LT} - (P_{Lsir} + P_{Lrir} + P_{Lh} + P_{Lm}) \quad (6)$$

Luego, se realiza una aproximación lineal de los resultados obtenidos en función del cuadrado nivel de carga, es decir $P_{Lsl} \propto T^2$, donde T es el par de carga.

III. SELECCIÓN DE MODELOS DE MI

Se proponen los siguientes criterios para la selección de modelos de MI para satisfacer los objetivos propuestos:

1. deben considerar todas las pérdidas, incluyendo las PA;
2. deben mantener una buena representación del par y la corriente;
3. sus parámetros deben obtenerse a partir de una cantidad reducida de ensayos;

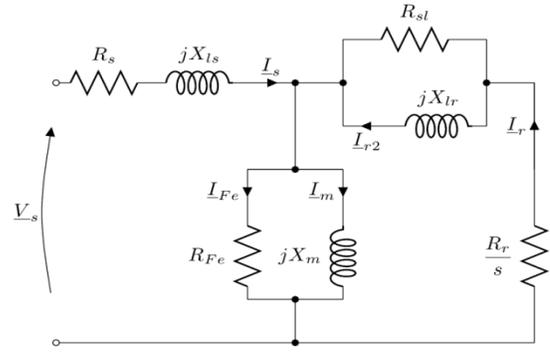


Figura 1. Modelo M1 [9].

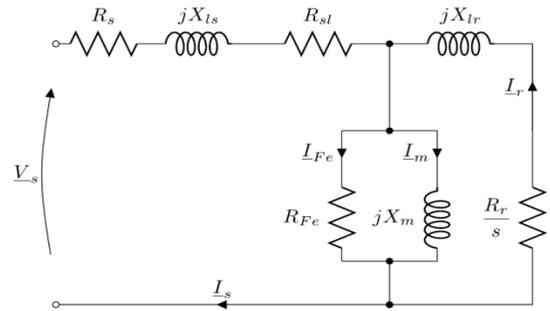


Figura 2. Modelo M2 [11].

4. deben poder utilizarse en el rango completo de operación;
5. deben ser simples para ser utilizados como subsistema en un modelo del VE.

En función de estos criterios, se seleccionaron dos modelos presentes en la literatura para ser estudiados, los cuales han sido descritos detalladamente y han sido probados en forma experimental [9-11].

El primer modelo fue propuesto en [9] y luego analizado en detalle en [10, 17]. El mismo se representa en la Fig. 1 a partir de un circuito eléctrico equivalente, el cual será referido como **M1**. En esta figura, V_s es la tensión de fase, R_r es la resistencia del rotor, X_{ls} , X_{lr} y X_m las reactancias de dispersión del estator, del rotor y de magnetización, respectivamente; R_{Fe} la resistencia equivalente de pérdidas en el núcleo y R_{sl} la resistencia equivalente de PA. Para la conformación del mismo, se parte del circuito eléctrico equivalente en régimen permanente convencional de la MI, al cual se agrega una resistencia en la rama del rotor para modelar las PA según el estándar IEEE 112-2004, i.e. las pérdidas adicionales son proporcionales al cuadrado del par y son cero cuando se opera sin carga. En [10] se muestra que es posible obtener buenas estimaciones para las potencias de entrada y salida, el par y la corriente de fase.

El otro modelo seleccionado fue propuesto en [11] y será referido como **M2**. En este caso, se modifica la rama del estator, en lugar de la del rotor, para incluir las PA, como se observa en la Fig. 2. Para describir **M2**, se parte de una simplificación del modelo presentado en [18], en el que se propone un circuito eléctrico equivalente de la MI que considera las PA debidas a los armónicos espaciales presentes en el entre-

hierro. Además, a partir de un análisis del balance de potencia considerando las PA, en [11] se deduce una expresión para obtener la resistencia equivalente de PA utilizando los ensayos estándar. En [11] y [19] se realiza una validación del modelo, pero sólo se analizan los resultados del rendimiento para diferentes niveles de carga, sin verificar si se mantienen válidos los valores de las corrientes y del par.

IV. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

Se estimaron los parámetros de los modelos **M1** y **M2** a partir de los ensayos especificados por el estándar [16] para el cálculo indirecto de las PA. Éstos pueden resumirse en: ensayo con rotor bloqueado, ensayos sin carga a diferentes tensiones y ensayos con carga variable a seis niveles de carga.

Se utilizó el banco de ensayos que se muestra en el diagrama de la Fig. 3. Este banco está conformado por dos MI acopladas por medio de un sensor de par. Una de las máquinas hace de carga y está alimentada por un accionamiento industrial que permite controlar la velocidad y el par de la máquina. La otra es la máquina ensayada y está alimentada a través de un autotransformador trifásico, el cual es utilizado para mantener la tensión constante durante los ensayos a carga variable y para modificarla durante los ensayos sin carga y con rotor bloqueado. La máquina ensayada tiene las siguientes características: potencia nominal: 4 kW; tensión de línea: 380 V; corriente nominal: 9 A; frecuencia: 50 Hz; velocidad angular nominal: 1450 RPM; 4 polos.

Según lo expuesto en [10], para establecer los parámetros de **M1** debe utilizarse inicialmente el procedimiento estándar para obtener los valores de R_s , L_m , L_{ls} , R_{Fe} y los valores iniciales L_{lr} , R_r . Luego, deben ajustarse los valores de R_r , L_{lr} y R_{sl} hasta que los resultados obtenidos a partir del circuito de la Fig. 1 se ajusten a los valores medidos en dichos ensayos. Para realizar este ajuste, no se cuenta con un valor inicial de R_{sl} y por lo tanto debe establecerse empíricamente.

En [11] se propone un método analítico para obtener el valor de R_{sl} del modelo **M2**. Debido a la incorporación de la resistencia equivalente de PA en la rama del estátor, deben redefinirse las pérdidas en el núcleo, tal como se propone en el trabajo citado. Si bien en [11] se deduce un procedimiento para la obtención de estas nuevas pérdidas en el núcleo, no se analiza su influencia en el cálculo del resto de los parámetros.

En el presente trabajo se concluyó que siguiendo los métodos propuestos en [10] y [11] para el ajuste de los parámetros de los modelos **M1** y **M2** no es posible obtener resultados satisfactorios para las variables par, corriente de fase y rendimiento. Se consideraron resultados satisfactorios aquellos cuyos errores de estimación relativos son menores al 10 %.

Por lo tanto, el procedimiento empleado en el presente trabajo consistió en la utilización de un método de ajuste por mínimos cuadrados en modelos no lineales para determinar los parámetros R_r , L_{lr} , R_{sl} , L_m y R_{Fe} . Para realizar el ajuste se tomaron como valores iniciales aquellos obtenidos a partir de los métodos propuestos en [10] y [11]. En la Tabla I se muestran los valores iniciales de los parámetros y los obtenidos del ajuste por mínimos cuadrados. Puede observarse que se han producido modificaciones importantes en algunos de ellos. Esto se

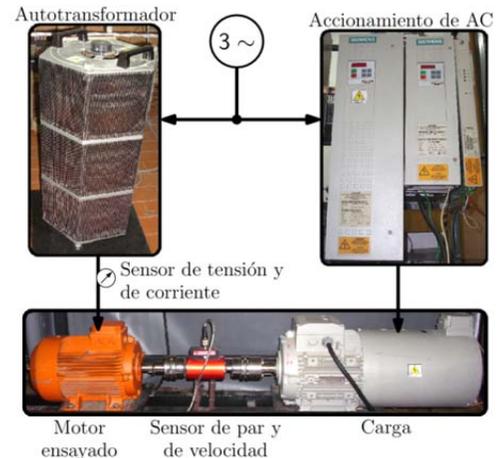


Figura 3. Banco de ensayos.

TABLA I
VALORES DE LOS PARÁMETROS.

Parámetro	M1 ini.	M1	M2 ini.	M2
R_s (Ω)	1.232	1.232	1.232	1.232
X_{ls} (Ω)	2.392	2.392	2.392	2.392
R_r ($m\Omega$)	625.8	856.5	627.7	866.5
X_{lr} (Ω)	2.391	3.290	2.392	1.196
X_m (Ω)	36.36	42.14	36.36	42.01
R_{Fe} (Ω)	310.1	323.0	346.4	340.5
R_{sl} ($m\Omega$)	-	897.2	435.6	568.7

TABLA II
ERROR RELATIVO PROMEDIO.

	Ajuste		Verificación	
	M1	M2	M1	M2
e_{p_e}	2.029 %	1.987 %	2.687 %	2.849 %
e_{p_m}	2.077 %	2.298 %	2.858 %	2.983 %
e_{η}	0.649 %	0.567 %	0.461 %	0.137 %
e_{T_m}	2.077 %	2.298 %	2.858 %	2.983 %
e_{I_s}	1.580 %	1.818 %	0.740 %	0.896 %

debe a que los procedimientos convencionales para su obtención no contemplan las variaciones producidas al considerar las PA. Además, en la Tabla II se muestran los promedios de los errores relativos resultantes en los seis puntos de operación a carga variable utilizados para el ajuste de los parámetros, para cada una de las variables estudiadas.

Por lo expuesto anteriormente, se concluye que deberían proponerse nuevos procedimientos analíticos para el cálculo de los parámetros para mejorar, en forma simultánea, las estimaciones del rendimiento, la corriente y el par.

V. VERIFICACIÓN DE LOS MODELOS

Se realizaron ensayos adicionales para probar los modelos en diferentes puntos de operación, utilizando los niveles de carga: 40 %, 60 %, 80 % y 110 %. En la Fig. 4 se muestran los valores del rendimiento en función del deslizamiento obtenidos a partir de ambos modelos (línea continua) junto con los valores utilizados para realizar el ajuste de los parámetros (representados con "x") y los nuevos resultados experimentales (indicados con "*"). De manera similar se representan el par y la corriente en función del deslizamiento en las Fig. 5 y 6, respectivamente. Puede observarse que los valores máximos del rendimiento se obtienen aproximadamente con un deslizamiento $s = 0.03$, lo que corresponde a un nivel de carga de 90 % y a una corriente de 0.97 p.u. Adicionalmente, en la Fig. 7 se muestran con línea continua las potencias mecánicas y con línea a trazos las potencias eléctricas obtenidas a partir de los modelos, junto con los resultados experimentales representados como en las figuras anteriores.

En la Tabla II se muestran los promedios de los errores relativos en los cuatro puntos de operación utilizados en la verificación, para cada una de las variables estudiadas, como una medida de la precisión del modelo.

En función de estos resultados, se concluye que con ambos modelos pueden obtenerse resultados similares. Sin embargo, a criterio de los autores, el modelo **M2** posee las siguientes ventajas sobre el modelo **M1**: se posee un procedimiento para calcular un valor inicial de R_{st} ; se representan mejor las PA, debido a que al utilizar la resistencia equivalente de PA en el estátor, es posible separar la parte de las PA que son incluidas en las pérdidas en el núcleo definidas por el estándar [11, 20]; simplifica los estudios sobre las PA, ya que pueden estimarse a partir de las corrientes del estátor [19].

Si bien estos modelos fueron seleccionados para aplicaciones de diseño de VE en los que se utiliza una MI para tracción, su utilización puede extenderse a otras aplicaciones.

VI. APLICACIÓN DEL MODELO: MAPAS DE RENDIMIENTO

Los mapas de rendimiento normalmente están representados a través de contornos 2D que indican el rendimiento en función del par y la velocidad del rotor. Son muy útiles en aplicaciones de diseño de VE/VEH, tales como: determinación del MR del vehículo completo, dimensionamiento de la transmisión [13], simplificación del cálculo de la potencia de salida para usar en estrategias de optimización del flujo de energía [2, 12], evaluación del consumo de potencia eléctrica de la máquina [4] y selección de la MI en función de su eficiencia.

Una desventaja de los MR es que en general se requiere de una gran cantidad de ensayos para su determinación. Además, los MR de la MI en aplicaciones tales como VE/VEH dependen de la estrategia de control utilizada. El uso de un modelo permite obtener MR a partir de un número significativamente menor de ensayos. Este hecho se torna más importante cuando se desea comparar los MR para distintas estrategias de control.

El modelo usado para esta aplicación debe ser válido en todo el rango de operación (par/velocidad) de la MI. Sin embargo, los modelos presentados en la Sección III son modelos en régimen permanente y hasta el momento no se han propuesto

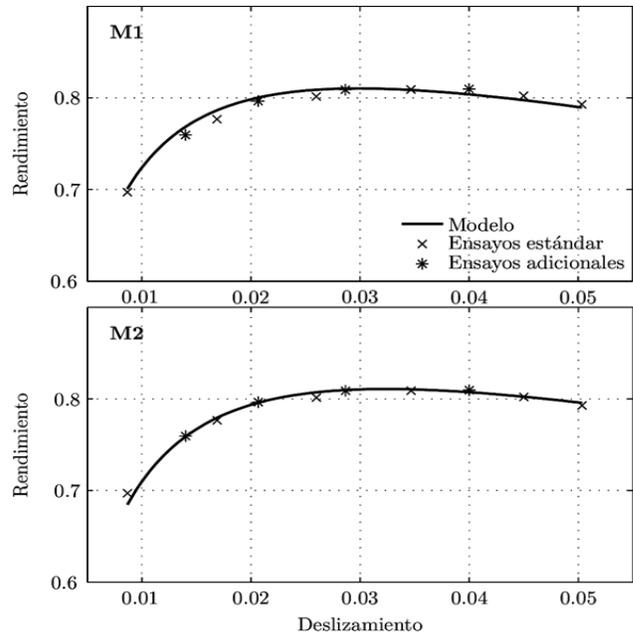


Figura 4. Rendimiento.

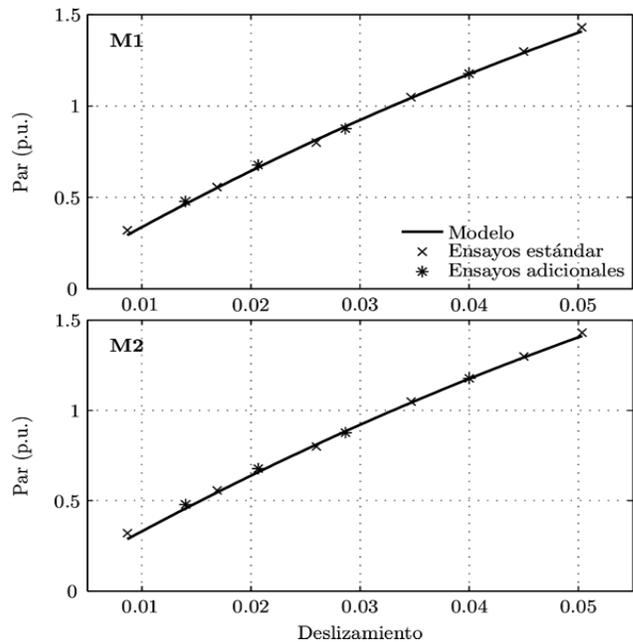


Figura 5. Par mecánico.

modificaciones de **M2** que permitan utilizarlo con frecuencias variables, de manera que permita considerar la dependencia de algunas de las pérdidas con la frecuencia, tales como P_{Lh} y P_{Lst} [9, 21, 22]. Es por esto que en este trabajo se utilizan parámetros dependientes con la frecuencia tal como se propone en [9]. En el caso de las pérdidas en el hierro, se pueden aproximar como $P_{Lh} \propto \omega^{1.3}$ [23]. Para las PA, algunos estudios muestran que pueden aproximarse en forma lineal con respecto a la

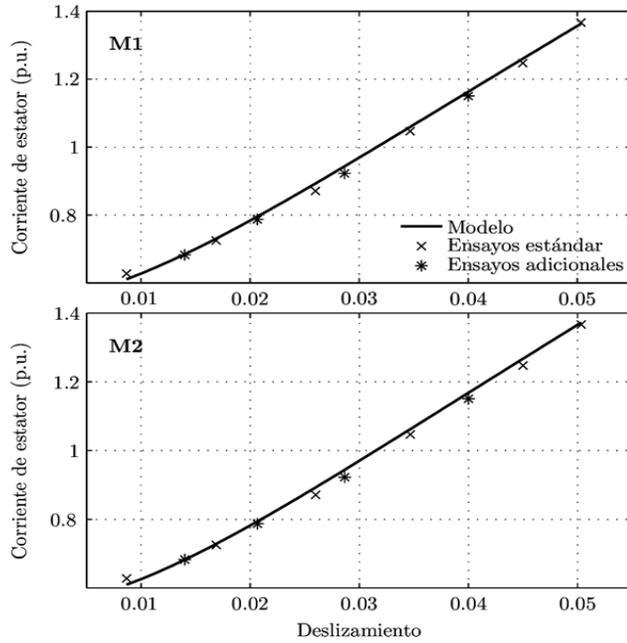


Figura 6. Corriente eficaz de fase.

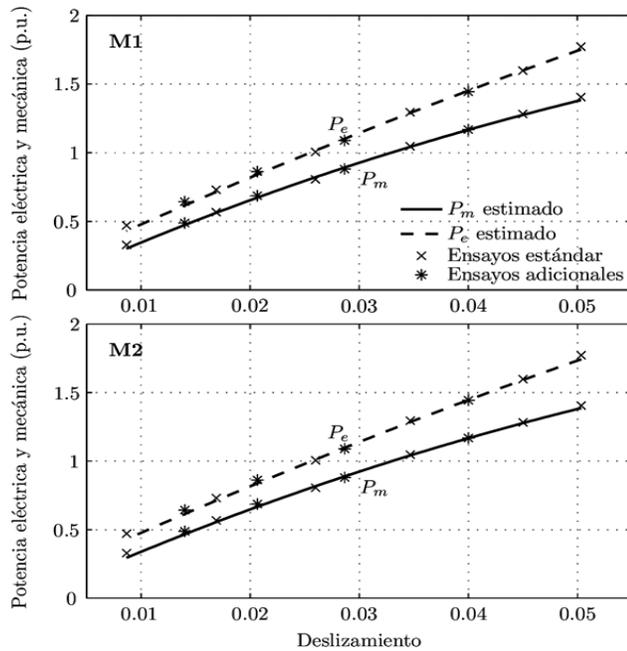


Figura 7. Potencia eléctrica y potencia mecánica.

frecuencia eléctrica [22]. Ambos comportamientos se modelaron redefiniendo los parámetros R_{sl} y R_{Fe} de la Fig. 2 como

$$\begin{aligned} R_{sl}(\omega_e) &= R_{slN} \frac{\omega_e}{\omega_{eN}} \\ R_{Fe}(\omega_e) &= R_{FeN} \frac{\omega_e^{0.7}}{\omega_{eN}^{0.7}} \end{aligned} \quad (7)$$

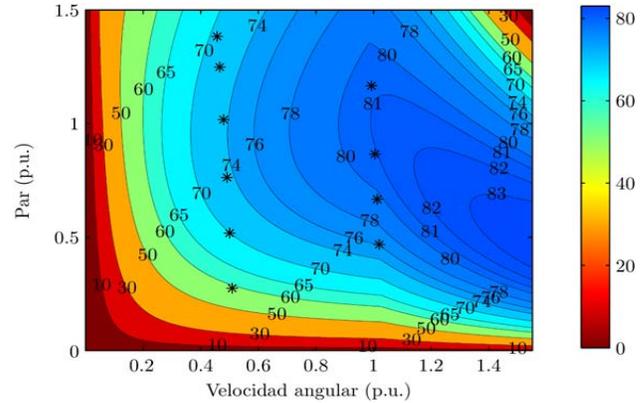


Figura 8. Mapa de rendimiento construido a partir del modelo M1.

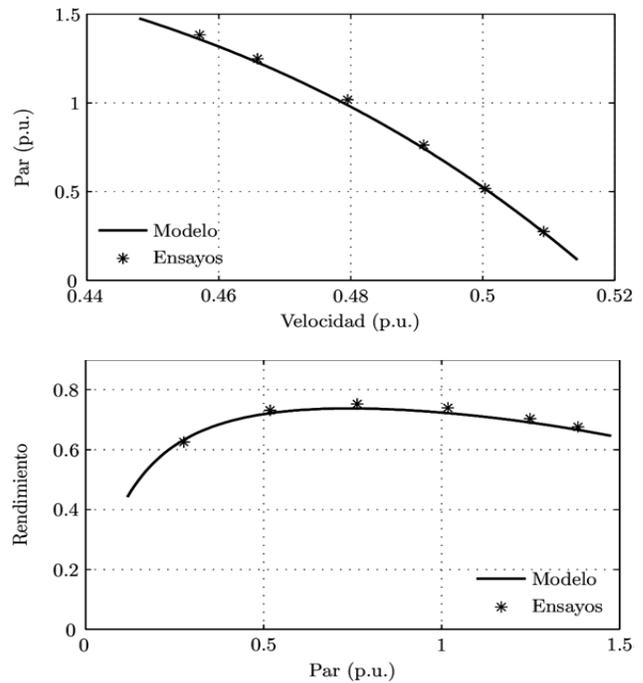


Figura 9. Ensayos a la mitad de la frecuencia nominal.

donde ω_e es la velocidad angular eléctrica, R_{slN} y R_{FeN} son las resistencias equivalentes de PA y de pérdidas en el núcleo, respectivamente, obtenidas a partir de los ensayos estándar a frecuencia nominal.

Incluyendo las modificaciones propuestas en el modelo, se obtuvo un MR de la máquina ensayada previamente, el cual se muestra en la Fig. 8. Para conformar este mapa, se calculó el par, la potencia eléctrica de entrada y la potencia mecánica de salida para diferentes combinaciones de tensiones, frecuencias eléctricas y velocidades del rotor. Dichos valores de entrada fueron seleccionados considerando una estrategia de control del tipo V/f constante.

Para verificar las modificaciones propuestas al modelo, se realizaron ensayos adicionales a la mitad de la frecuencia nominal. En la Fig. 8 los puntos de operación adicionales se representan con asteriscos, junto con los valores obtenidos en los ensayos usados en la Sección V. Puede observarse que

para las velocidades cercanas a los 0.5 p.u., con un control V/f no se obtienen rendimientos mayores al 75 %.

La Fig. 9 muestra resultados obtenidos en estos últimos ensayos, con una línea continua para valores calculados con el modelo a la mitad de la frecuencia nominal y con asteriscos las mediciones de los ensayos. Se representa el par versus la velocidad del rotor y el rendimiento en función del par. Como puede observarse, se confirma la observación realizada previamente sobre el MR y puede concluirse que el modelo sigue brindando buenos resultados en la evaluación del rendimiento en velocidades distintas de las ensayadas.

Debe observarse que sólo fueron realizados los ensayos propuestos por el estándar del IEEE 112 para conformar el MR. Las modificaciones propuestas en (7) deben considerarse como un primer intento para obtener un modelo utilizable en el rango completo de operación.

VII. CONCLUSIONES

Se investigó sobre modelos de MI para efectuar estudios de rendimiento en aplicaciones de VE/VEH. Se seleccionaron dos modelos simples, **M1** y **M2**, basados en el modelo tradicional de la MI, para realizar una comparación entre ellos. Se propuso un procedimiento para realizar el ajuste de sus parámetros y se obtuvo el error de estimación para algunos puntos de operación. Se concluyó que deben investigarse nuevos procedimientos analíticos para el cálculo de los parámetros de los modelos cuando se consideran las pérdidas de la MI.

A partir de nuevos resultados obtenidos, se validaron ambos modelos, concluyendo que son adecuados para las aplicaciones de interés, ya que es posible ajustar sus parámetros utilizando una cantidad reducida de ensayos y obtener buenas estimaciones de los valores de potencia, corriente y par. Por su mayor simplicidad y por facilitar el ajuste de sus parámetros, se prefiere la utilización del modelo **M2**.

Finalmente, se propuso una aplicación del modelo, la cual consiste en construir un mapa de rendimiento de una MI a partir del modelo. El MR se validó mediante nuevos resultados experimentales obtenidos a la mitad de la velocidad nominal. De esta aplicación, se concluyó que deben realizarse más estudios sobre la variación de los parámetros del modelo cuando se utilizan accionamientos de velocidad variable.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Universidad Nacional de Río Cuarto, el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas (CONICET) y Técnicas y la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT-FONCyT), Argentina.

REFERENCIAS

- [1] M. Amrhein and P. Krein, "Dynamic simulation for analysis of hybrid electric vehicle system and subsystem interactions, including power electronics," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 54, no. 3, pp. 825–836, 2005.
- [2] L. V. Pérez and E. A. Pilotta, "Optimal power split in a hybrid electric vehicle using direct transcription of an optimal control problem," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 79, no. 6, pp. 1959–1970, Feb. 2009.
- [3] J. de Santiago, H. Bernhoff, B. Ekerghard, S. Eriksson, S. Ferhatovic, R. Waters, and M. Leijon, "Electrical motor drivelines in commercial All-Electric vehicles: A review," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 61, no. 2, pp. 475–484, 2012.
- [4] D. Vanhooydonck, W. Symens, W. Deprez, J. Lemmens, K. Stockman, and S. Dereyne, "Calculating energy consumption of motor systems with varying load using iso efficiency contours," in *Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on*, 2010, pp. 1–6.
- [5] W. Deprez, J. Lemmens, D. Vanhooydonck, W. Symens, K. Stockman, S. Dereyne, and J. Driesen, "Iso efficiency contours as a concept to characterize variable speed drive efficiency," in *Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on*, 2010, pp. 1–6.
- [6] A. Bazzi and P. Krein, "Comparative evaluation of machines for electric and hybrid vehicles based on dynamic operation and loss minimization," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE*, 2010, pp. 3345–3351.
- [7] D. Cundev and P. Mindl, "European driving schedule of hybrid electric vehicle with electric power splitter and supercapacitor as electric storage unit," in *Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on*, 2008, pp. 1–5.
- [8] A. De Almeida, F. Ferreira, and J. Fong, "Standards for efficiency of electric motors," *Industry Applications Magazine, IEEE*, vol. 17, no. 1, pp. 12–19, 2011.
- [9] A. Lamine and E. Levi, "Dynamic induction machine modelling considering the stray load losses," in *Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004. 39th International*, vol. 2, 2004, pp. 582–586 vol. 1.
- [10] E. Levi, A. Lamine, and A. Cavagnino, "Impact of stray load losses on vector control accuracy in current-fed induction motor drives," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 2, pp. 442–450, 2006.
- [11] A. Boglietti, A. Cavagnino, L. Ferraris, and M. Lazzari, "Induction motor equivalent circuit including the stray load losses in the machine power balance," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 3, pp. 796–803, 2008.
- [12] L. Perez, G. Bossio, D. Moitre, and G. Garcia, "Optimization of power management in an hybrid electric vehicle using dynamic programming," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 73, no. 1-4, pp. 244–254, Nov. 2006.
- [13] W. Wei, W. Qingnian, Y. Yuanbin, Z. Xiaohua, and Z. Naiwei, "Study on the operation region of induction traction motor for electric vehicle," in *Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2009. ICMTMA '09. International Conference on*, vol. 2, 2009, pp. 699–703.
- [14] S. Williamson, M. Lukic, and A. Emadi, "Comprehensive drive train efficiency analysis of hybrid electric and fuel cell vehicles based on motor-controller efficiency modeling," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 3, pp. 730–740, 2006.
- [15] C. Shumei, L. Chen, and S. liwei, "Study on efficiency calculation model of induction motors for electric vehicles," in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE*, 2008, pp. 1–5.
- [16] "IEEE standard test procedure for polyphase induction motors and generators," 10.1109/IEEESTD.2004.95394, 2004.
- [17] E. Levi, A. Lamine, and A. Cavagnino, "Detuned operation of vector controlled induction machines due to stray load losses," in *Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005*, vol. 1, 2005, pp. 500–507 Vol. 1.
- [18] P. Alger, *Induction machines : their behavior and uses*, ed.2, rev. & updated. ed.1em plus 0.5em minus 0.4emNew York: Gordon & Breach, 1970.
- [19] A. Boglietti, A. Cavagnino, L. Ferraris, and M. Lazzari, "Impact of the supply voltage on the Stray-Load losses in induction motors," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 46, no. 4, pp. 1374–1380, 2010.
- [20] K. Yamazaki and Y. Watanabe, "Stray load loss analysis of cage induction motors considering inter-bar currents using 3-D finite element method," in *Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference on*, 2005, pp. 585–590.
- [21] E. Levi, "Impact of iron loss on behavior of vector controlled induction machines," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 31, no. 6, pp. 1287–1296, 1995.
- [22] A. Wallace, A. von Jouanne, and A. Nagorny, "Evaluation of stray load losses in induction motors at different supply frequencies," in *Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the*, vol. 4, 2002, pp. 2296–2300 vol.4.

- [23] L. Youjie, "Asynchronous motor's Maximum-Efficiency control considering variable iron loss equivalent resistance by adjusting the ratio of active power to reactive power," in *Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference on*, 2010, pp. 3396–3399.



Facundo Aguilera (S'05) nació en San Luis, Argentina, en 1985. Recibió el título de Ingeniero Electrónico con Orientación en Sistemas Digitales en la Universidad Nacional de San Luis, Argentina, en 2009. Es miembro del Grupo de Electrónica Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina, desde el año 2010. Actualmente se encuentra realizando el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería. Sus temas de investigación actuales son: accionamientos eléctricos, vehículos eléctricos, tolerancia a fallas, sistemas digitales.



Pablo Martín de La Barrera (S'99 - GS'08 - M'09) nació en Río Cuarto, Argentina, en 1978. Recibió los títulos de Ingeniero Electricista y de Magister en Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto, en 2003 y 2006, respectivamente, y el grado de Doctor en Control de Sistemas de la Universidad Nacional del Sur, Argentina, en 2009. En 1998 se unió al Grupo de Electrónica Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto. Actualmente es Investigador Asistente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Sus temas de interés en investigación son el modelado y control de motores de inducción, detección de fallas en máquinas eléctricas y generación de energías renovables.



Cristian Hernán De Angelo (S'96 – M'05 – SM'10) recibió su título de Ingeniero Electricista en la Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina, en 1999, y el grado de Dr. en Ingeniería en la Universidad Nacional de La Plata, Argentina, en 2004. Desde 1994, se encuentra trabajando en el Grupo de Electrónica Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto. Actualmente es Profesor Adjunto en la Universidad Nacional de Río Cuarto e Investigador Adjunto del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina. Sus temas de interés en investigación incluyen diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas, accionamientos eléctricos, vehículos eléctricos, y energías renovables. Actualmente es Presidente del Capítulo Conjunto Argentino de IEEE.