

Efficiency Measurements in Induction Motors: Comparison of Standards

C. Verucchi, C. Ruschetti and F. Bengier

Abstract— Recently, in an attempt to limit the growing energy demand in modern societies, it has been provided new guidelines in relation to the efficiency levels for electric motors. From them, different efficiency categories have been defined, which determine the limits for Standard Efficiency, High Efficiency, Premium Efficiency and Super Premium Efficiency motors. Most countries, consequently, have established restrictions to the use of low efficiency motors. Given that a little mistake in the process of the motor efficiency measurement could cause an incorrect classification, the standards to establish the electrical machines test procedures have been revised. Each standard, meanwhile, provide different test procedures. Each one allows calculating with more or less accuracy the motor efficiency, according to several available tools like dynamometer bench, torque sensor, windings temperature measurement, and others. This paper presents a comparison of some of the most commonly used standards for electrical motors efficiency measurement. The comparison is carried out using as reference the so-called direct method which consists in directly measuring the input and output power of the motor, with a strict control of the laboratory's ambient temperature and the engine power conditions. Comparisons allow conclusions regarding the probable errors in the application of each standard.

Keywords— Energy efficiency, induction motor, high efficiency motors, rotary electrical machine tests, IEC, IEEE, Standard.

I. INTRODUCCIÓN

Si bien la eficiencia energética siempre ha sido un indicador de gran importancia a la hora de evaluar las prestaciones de las máquinas eléctricas de inducción, se observa que durante los últimos años tal importancia se ha visto incrementada notoriamente. En aplicaciones industriales, el motor de inducción constituye la variante más recurrente para disponer de fuerza motriz. Se han realizado estudios que indican que entre un 80 y un 90 % de la energía eléctrica que se consume en el sector industrial se emplea para el accionamiento de este tipo de máquinas [1]. Si se considera, además, que una importante fracción de la energía eléctrica generada en todo el planeta se consume en aplicaciones industriales, se advierte que el incremento de la eficiencia de los motores eléctricos tendría gran impacto sobre la matriz energética. Más allá de este aspecto de carácter ecológico, es evidente que una mayor eficiencia deriva también en un menor

consumo para una determinada aplicación y por ende en un ahorro económico.

A partir de las observaciones anteriores, y a la luz de los esfuerzos que se realizan para avanzar hacia un uso más racional de la energía en todo el mundo, se han impuesto recientemente restricciones en los niveles de eficiencia asociados a motores eléctricos. Con el fin de establecer criterios precisos para la clasificación de los motores de inducción en función de la eficiencia, la IEC (International Electrotechnical Commission) definió en 2009 cuatro clases de motores. Los motores de eficiencia estándar o clase IE1, los de alta eficiencia, o clase IE2; los de muy alta eficiencia o IE3 y los de eficiencia Premium o IE4 [2]. Desde 2010, muchos países prohíben la comercialización de motores que tengan eficiencias por debajo de los límites establecidos por las normativas internacionales. La legislación europea, por ejemplo, fijó plazos para las restricciones en la comercialización de motores de bajos rendimientos a través de la resolución CE Nro. 640/2009 del 22 julio 2009 [3]. En ella se establece que:

— Desde junio de 2011 el rendimiento mínimo de los motores que se fabriquen no podrá ser inferior al establecido para la categoría IE2.

— Desde 2015 el rendimiento mínimo de los motores de 7,5 a 375 kW será el dado por la categoría IE3 y,

— Desde 2017 la obligación de los rendimientos de clase IE3 se extenderá también a los motores de entre 0,75 kW y 5,5 kW.

En Estados Unidos, desde diciembre de 2010 se deben respetar obligatoriamente los niveles de eficiencia fijados por la norma NEMA, similares a los de la IEC [4]. En Argentina, y a instancias de la Secretaría de Energía, el IRAM publicó en 2010 la norma 62405 [5]. Esta norma obliga al etiquetado de los motores de inducción trifásicos, debiéndose indicar en cada motor puesto a la venta la categoría IEC a la cual pertenece. Por el momento, esta normativa sólo exige la identificación, sin hacer referencia a la prohibición de comercializar motores de bajos niveles de rendimiento. En Brasil, por su parte, desde el inicio de 2010, todos los motores de propósito general que se pongan a la venta deberán tener como mínimo la eficiencia estipulada por la categoría IE2 de la IEC. En Chile asimismo, desde 2011 rige la obligación de identificar a los motores comercializados de acuerdo con las categorías establecidas por dicha normativa.

Entre otras modificaciones, los motores de alta eficiencia emplean mejores materiales magnéticos y mayor cantidad de cobre que los motores convencionales. Estas variantes encarecen su costo y, a la hora de seleccionar una unidad, los usuarios se sienten tentados de utilizar motores de eficiencia

C. Verucchi, Grupo INTELYMEC, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, verucchi@fio.unicen.edu.ar

C. Ruschetti, Grupo INTELYMEC, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, CONICET, cruschet@fio.unicen.edu.ar

F. Bengier, Grupo INTELYMEC, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, fbenger@fio.unicen.edu.ar

estándar con el fin de minimizar la inversión. Sin embargo, varios autores demuestran que el costo adicional puesto en juego al adquirir un motor de alta o muy alta eficiencia se recupera en muy corto plazo debido al ahorro de energía que los mismos permiten [6]. Algunos autores, por otra parte, proponen rebobinar unidades en uso introduciendo modificaciones apropiadas en los devanados de estator con el fin de incrementar la eficiencia [7-9].

En base a las observaciones anteriores, es posible concluir que la medición de la eficiencia de un motor resulta una operación que ha recobrado importancia últimamente. Un pequeño error en su cálculo puede modificar la categoría que le corresponde a un motor según la clasificación de la IEC o puede derivar en cálculos equivocados de consumo de energía para una aplicación determinada. Por otra parte, cabe señalar que la eficiencia de un motor eléctrico guarda estrecha vinculación con las condiciones de uso. En efecto, la eficiencia varía con el nivel de carga de un motor, con la temperatura de funcionamiento, con la calidad de las tensiones de alimentación (desbalance, bajo voltaje, distorsión armónica) [10-13], entre otras. Por consiguiente, su medición no resulta del todo sencilla. Otro aspecto que tiene incidencia sobre la medición de la eficiencia de un motor es el tipo de equipamiento y el instrumental con que se cuente en el laboratorio donde se efectúen los ensayos. Todo esto ha llevado a que las normativas que permiten estandarizar los ensayos ofrezcan varias alternativas en función del equipamiento con el que se cuente. Cada una de dichas alternativas, y cada método de ensayo propuesto por cada una de las organizaciones que los normalizan, involucran errores. El objetivo de este trabajo consiste en revisar los principales estándares disponibles para efectuar los ensayos y analizar los errores cometidos en cada caso.

II. PÉRDIDAS EN LOS MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN

Las pérdidas en los motores de inducción se clasifican en dos categorías: pérdidas constantes y pérdidas variables. Las primeras están dadas por las pérdidas que resultan aproximadamente independientes del estado de carga del motor. Las pérdidas en el hierro y las pérdidas por roce y ventilación corresponden a este grupo. Las variables, por el contrario, son aquellas que están vinculadas con el nivel de carga del motor.

Otra clasificación, que hace referencia a las causas de cada pérdida de potencia, distingue cinco variantes [14]:

- Pérdidas en el cobre del estator. Vienen dadas por el calor disipado por efecto Joule en los devanados de estator al circular por ellos la corriente de estator.

- Pérdidas en el cobre del rotor. Del mismo modo que ocurre en el estator, los devanados del rotor (barras y anillos de cortocircuito), presentan pérdidas por efecto Joule.

- Pérdidas en el hierro. Son las debidas a la excitación alterna del núcleo magnético de la máquina. Se subdividen en pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas, que resultan proporcionales al cuadrado de la inducción magnética en el entrehierro. Teniendo en cuenta que el valor de inducción magnética se mantiene aproximadamente constante para

cualquier nivel de carga del motor, es posible asegurar que las pérdidas en el hierro son aproximadamente constantes. Un cálculo más exacto debería tener en cuenta la reducción de inducción magnética en el entrehierro debido al aumento de la caída de tensión en la resistencia y reactancia de dispersión del estator.

- Pérdidas de roce y ventilación. Generalmente se las considera en forma asociada debido a que constituyen la potencia mecánica que debe disponerse para hacer girar al rotor libre (en vacío) y al ventilador. Dependen de la velocidad del rotor y, teniendo en cuenta que las variaciones de velocidad entre las condiciones de vacío y de plena carga no superan el 2 o 3 % de la velocidad de sincronismo, pueden considerarse constantes.

- Pérdidas adicionales. Los motores de inducción presentan una serie de pérdidas de origen variado que no están incluidas en la clasificación anterior. A estas pérdidas se las agrupa dentro de la categoría de pérdidas adicionales. Una componente de las pérdidas adicionales se presenta con el motor en vacío mientras que otras resultan dependientes de la carga. En [15,16] se presenta una clasificación de las principales pérdidas adicionales. Se deben, entre otras razones, a flujos armónicos producto de la diferencia en la permeancia de estator y rotor provocada por la sucesión de dientes y ranuras, flujos armónicos originados en la geometría de los devanados, corrientes inducidas en distintas piezas del motor (carcasa, ejes, etc.) por acción de flujos de dispersión en las cabezas de bobinas, etc. Resultan las pérdidas más difíciles de cuantificar debido a que, a diferencia de las anteriores, no existen ensayos sencillos que permitan estimarlas.

III. ENSAYOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE UN MOTOR

A. Método directo

Este método consiste en llevar al motor a su condición de funcionamiento nominal y calcular directamente el rendimiento como el cociente entre la potencia de salida y la de entrada. Dado que la eficiencia debe indicarse para una temperatura ambiente de 25 °C y con el motor a la temperatura de régimen, la determinación de la eficiencia de un motor mediante este método implica la doble dificultad de mantener controlada la temperatura ambiente del laboratorio en el que se realiza el ensayo en 25 °C y llevar al motor a su temperatura de régimen. Para ello puede ser necesario mantener el motor funcionando con carga nominal por varias horas. Los estándares cuya evaluación se presenta en este trabajo permiten una estimación de la eficiencia con ensayos más simples. El método directo será utilizado como punto de referencia para cuantificar el error de los métodos estandarizados.

B. IEEE 112 – Método B

Utilizado principalmente en los EEUU, el estándar IEEE 112 [17] sugiere varias metodologías de ensayos para motores de inducción. La diferencia principal entre ellas radica en que algunas requieren el uso de un freno dinamométrico para

simular la condición de carga del motor y medir el par motor entregado, y otras, por su parte, prescinden de tal elemento y se limitan a las pruebas de vacío y de rotor bloqueado para obtener un cálculo aproximado de la eficiencia. Entre las primeras alternativas se encuentra el denominado Método B, uno de los más utilizados y citados por la bibliografía [18]. El método IEEE 112 B se basa en las tradicionales pruebas de vacío y de rotor bloqueado más una prueba de carga. Con la prueba de vacío se calculan las pérdidas en el hierro, las cuales se asumen constantes para cualquier estado de carga del motor y con la prueba de rotor bloqueado se calculan las pérdidas en el cobre del estator y rotor para una corriente determinada. Las pérdidas en el cobre del estator se consideran dependientes del cuadrado de la corriente en los devanados. La resistencia de estator, medida o calculada a 25 °C se corrige a la denominada temperatura de régimen del motor. Tal temperatura de régimen es la temperatura que alcanza el motor cuando funciona en un ambiente a 25 °C en régimen nominal y en equilibrio térmico. Su determinación se realiza de la siguiente manera. Primero se lleva al motor a régimen nominal y se espera el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio térmico. La temperatura se calcula indirectamente por comparación de las resistencias antes y después del ensayo. Se asume que la temperatura de régimen ha sido alcanzada cuando los cambio entre dos mediciones consecutivas distanciadas media hora una de otra arroja una diferencia menor al 1 %. De este modo se calcula el incremento de temperatura respecto a la temperatura ambiente del lugar en donde se efectúa el ensayo. Finalmente, la temperatura de régimen será aquella que resulta de la suma de dicha elevación y los 25 °C a los cuales debe indicarse el valor de eficiencia de un motor. Posteriormente se corrige el valor de resistencia de estator en función de la temperatura de régimen y las pérdidas en el cobre del estator se calculan con el nuevo valor de resistencia.

Para el cálculo de las pérdidas en el cobre del rotor se debe calcular primeramente el deslizamiento corregido a la temperatura de régimen o específica de la siguiente manera:

$$s_s = \frac{s_t \cdot (t_s + k_1)}{(t_t + k_1)} \quad (1)$$

Donde t_s y t_t son las temperaturas específicas y la temperatura a la cual se efectuó el ensayo de carga respectivamente (expresadas en grados centígrados). Asimismo, s_s es el deslizamiento corregido a la temperatura t_s y s_t es el deslizamiento registrado en el ensayo de carga para una carga determinada. Finalmente k_1 es una constante que vale 234,5 para conductores de cobre y 225 para aluminio [17]. Luego, las pérdidas en el cobre del rotor se calculan, corregidas a la temperatura de régimen como:

$$P_{curc} = (P_{Entrada} - P_{cus} - P_{Fe}) \cdot s_s \quad (2)$$

Donde P_{curc} es la potencia de pérdidas en el cobre del rotor corregida a la temperatura de régimen, $P_{Entrada}$ es la potencia absorbida por el motor en el ensayo de carga, P_{cus} son las pérdidas en el cobre del estator a la temperatura del devanado durante el ensayo de carga y P_{Fe} son las pérdidas en el hierro extraídas del ensayo de vacío del motor. Las pérdidas adicionales (P_{Ad}), por su parte, se asumen proporcionales al cuadrado del par motor y se aproximan con la siguiente ecuación:

$$P_{Ad} = A \cdot T^2 + B \quad (3)$$

Donde T es el par motor; A y B son constantes que serán calculadas para cada motor en base a ensayos.

Para régimen nominal se calculan como la diferencia entre las pérdidas totales y la suma de las demás pérdidas. Esto es:

$$P_{Ad} = P_{Tot} - (P_{cus} + P_{cur} + P_{Fe} + P_{r+v}) \quad (4)$$

Donde P_{r+v} son las pérdidas de roce y ventilación y P_{cur} son las pérdidas en el cobre del rotor a la temperatura del devanado durante el ensayo de carga, P_{Tot} está dado por:

$$P_{Tot} = P_{Entrada} - P_{Salida} \quad (5)$$

El ensayo en carga del motor, se realiza, siguiendo la norma, con carga variable entre 0 y 150 % de la nominal aproximadamente. Así, se mide la tensión, la corriente, la potencia y el par motor en cada punto, determinándose a partir de estos datos los valores de deslizamiento, pérdidas en el cobre del estator y rotor, potencia de salida y pérdidas adicionales. Se deben tomar al menos 5 puntos por debajo de la potencia nominal y 3 por encima de la misma. Luego, con la ecuación (3) se representa gráficamente la variación de pérdidas adicionales en función del par motor al cuadrado. De acuerdo a la norma, si la pendiente de la curva es negativa o el factor de correlación entre las dos variables es menor que 0.9, debe repetirse el ensayo. Finalmente, la recta de P_{Ad} se corrige haciendo que pase por el origen de coordenadas, manteniendo la pendiente original:

$$P_{Adc} = A \cdot T^2 \quad (6)$$

donde P_{Adc} son las pérdidas adicionales corregidas.

Finalmente, las pérdidas totales corregidas (P_{Totc}) resultan:

$$P_{Totc} = P_{r+v} + P_{Fe} + P_{Adc} + P_{cusc} + P_{curc} \quad (7)$$

La potencia mecánica, con valores corregidos resulta:

$$P_{Salidac} = P_{Entrada} - P_{Totc} \quad (8)$$

El rendimiento del motor, por último, se calcula como:

$$\eta = \frac{P_{Salidac}}{P_{Entrada}} \cdot 100 \quad (9)$$

C. IEC 60034-2-1

La última versión de la normativa IEC para el cálculo de eficiencia en motores eléctricos de inducción data del año 2007 y presenta gran similitud con la IEEE 112 B [19]. Esta normativa ha sido adoptada por la Comunidad Europea. Desde un punto de vista práctico puede afirmarse que la única diferencia significativa, entre un procedimiento de ensayo y otro, radica en el tratamiento que se hace respecto a las pérdidas en el hierro. Mientras que el estándar IEEE 112 B considera que las pérdidas en el hierro son constantes para cualquier estado de carga del motor, la IEC 60034-2-1 corrige dichas pérdidas en función del cuadrado de la tensión aplicada sobre la rama magnetizante del circuito equivalente tradicional [20]. El cálculo de dicha tensión es aproximado y viene dado por:

$$U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \cos(\varphi)\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \sin(\varphi)\right)^2} \quad (10)$$

Donde U_r es la tensión en la rama magnetizante con la que se ajustan las pérdidas en el hierro para cada punto de carga del motor, U , I y R son la tensión, corriente y resistencia de estator respectivamente y φ el ángulo que determina el factor de potencia.

D. IEEE 112 F1

Tal como se indicó anteriormente, los dos métodos descriptos requieren la realización de la prueba de carga del motor del cual se desea calcular el rendimiento. La prueba de carga requiere de un freno o un generador utilizado como carga y de un sensor de torque. Dado que no todos los laboratorios cuentan con tales equipos, sobre todo para motores de gran potencia, el método F1 del estándar IEEE 112 ofrece una alternativa que permite prescindir del ensayo en carga. El procedimiento se basa en el desarrollo del circuito equivalente monofásico del motor de inducción. Mediante la prueba de vacío y la de rotor bloqueado (para grandes potencias se sugiere realizar esta prueba a frecuencia nominal y a una frecuencia del 25 % de la nominal para diferenciar entre la resistencia óhmica y efectiva del rotor) se calculan los parámetros de dicho circuito equivalente. Las pérdidas adicionales se calculan como un porcentaje fijo de la potencia nominal del motor (para motores de potencias menores a 90 kW se debe tomar 1,8 %). Por otra parte, la temperatura de régimen del motor se selecciona de una tabla en función de la clase de aislación del bobinado (por ejemplo 115 °C para aislación clase F).

IV. COMPARACIÓN EXPERIMENTAL

Con el fin de poner a prueba cada uno de los métodos enumerados en la sección anterior se procedió a aplicarlos en el cálculo de la eficiencia en un motor de 5,5 kW, 4 polos, 380 V. Se midió además, la eficiencia del motor con el denominado método directo, manteniendo la temperatura ambiente en 25 °C y habiendo llevado, anteriormente, el motor a su temperatura de régimen (80 °C). Los valores obtenidos de esta manera se consideran valores de referencias con los cuales serán comparados los valores obtenidos por los métodos analizados. En todos los ensayos se mantuvo la tensión de alimentación en su valor nominal con una error menor al 0,5 % y un desbalance de tensiones menor al 1 %. El motor fue llevado a distintos niveles de carga, entre 0 y 150 % de la potencia nominal, por medio de un freno de corrientes parásitas que permite medir el torque aplicado. En la Fig. 1 puede apreciarse el montaje de laboratorio.

Las curvas obtenidas se presentan en la Fig. 2. Se desprende de la misma que las dos técnicas que necesitan el ensayo de carga para determinar la eficiencia arrojaron valores por debajo de los tomados como referencia (método directo). El procedimiento que permite evitar el ensayo de carga (IEEE 112 F1), por el contrario, establece valores de eficiencia por encima de los de referencia. Respecto a las curvas trazadas a partir de los ensayos IEEE 112 B y IEC 60034, se observa que para bajas cargas, cuando las pérdidas en el hierro se mantienen cercanas a las obtenidas en el ensayo de vacío, los

valores obtenidos son prácticamente coincidentes. A medida que el motor toma carga, y debido a que el flujo magnético en el entrehierro se reduce al aumentar la caída de tensión en la impedancia del estator, los valores de eficiencia arrojados por el método IEC 60034 son algo mayores a los del IEEE 112 B. Esto se debe a que aquel método corrige las pérdidas en el hierro mientras que este último las considera constantes para cualquier valor de carga. En la Tabla I se presentan los errores cometidos por cada técnica en comparación con el método de referencia. Paradójicamente, la medición que presenta mayor aproximación a la que se toma como referencia, se obtuvo con la técnica más simple y de menores requerimientos. Esta particularidad no puede garantizarse sin embargo para ensayos en motores de otras potencias. En efecto, dado que la técnica IEEE 112 F1 asigna arbitrariamente pérdidas adicionales como porcentaje de la potencia nominal, dependiendo de la potencia del motor podría variar el error cometido en el cálculo.

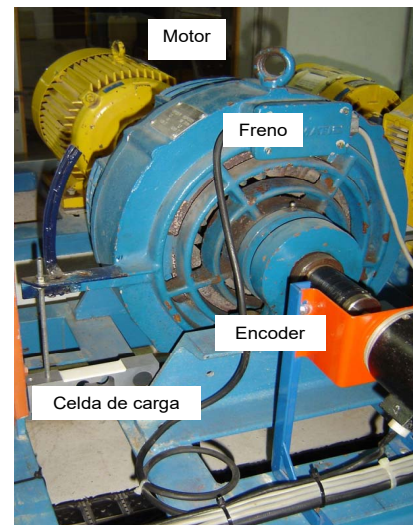


Figura 1. Montaje de laboratorio para medición de la eficiencia.

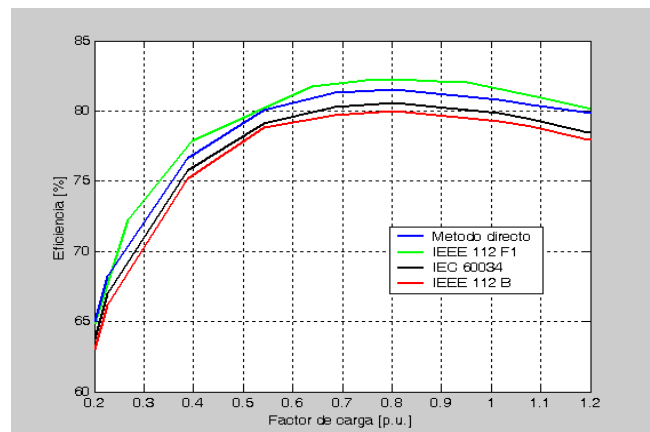


Figura 2. Curvas de rendimiento para distintos procedimientos de ensayo en motor de 5,5 kW.

TABLA I. ERRORES ABSOLUTOS DE CADA STANDARD EN COMPARACIÓN CON MÉTODO DIRECTO PARA DISTINTOS FACTORES DE CARGA.

	50 %	75 %	100 %
IEEE 112 B	-1,21	-1,6	-1,56
IEC 60034-2-1	-0,93	-1	-0,98
IEEE 112 F1	0,47	0,76	0,82

TABLA II. PÉRDIDAS PARA CARGA NOMINAL CONSIDERADAS POR CADA METODOLOGÍA DE ENSAYO EN W.

	IEEE 112 B	IEC 60034	IEEE 112 F1
P_{cus}	515,7	515,7	397,1
P_{cur}	261,6	261,6	199,6
P_{Fe}	424,1	383,5	374,5
P_{r+v}	52,9	52,9	52,9
P_{Ad}	181,3	180,3	63,4
P_{Tot}	1435,6	1394	1087,5

En la Tabla II se presenta una comparación de las pérdidas calculadas por medio de cada uno de los procedimientos empleados, para régimen nominal. Las diferencias entre el método IEEE 112 B y el IEC 60034 se presentan únicamente en las pérdidas en el hierro. En el último, dado que se efectúa una corrección de dichas pérdidas en función de la tensión estimada en la rama magnetizante del circuito equivalente, resultan algo menores. El método IEEE 112 F1 presenta diferencias en el cálculo de las pérdidas en el cobre del estator y rotor. Esto se debe a que el método calcula a través del circuito equivalente las corrientes de estator y rotor para régimen nominal y las mismas resultan ligeramente diferentes a las utilizadas por los otros métodos. También se observa una diferencia en el cálculo de pérdidas adicionales debido que en este caso se calculan como un porcentaje de la potencia nominal del motor y no se miden en el ensayo.

V. CONCLUSIONES

Tres de las técnicas más empleadas para estimación de eficiencia en máquinas eléctricas han sido descriptas y comparadas. Con el fin de evaluar sus prestaciones fueron utilizadas para la medición de la eficiencia de un motor de 5,5 kW y comparadas con la medición extraída del método directo. Los resultados muestran que cualquiera de las normas de ensayo presentan errores que oscilan entre 0,5 y 1,5 % aproximadamente para cargas entre 50 y 100 % de la nominal. En el caso estudiado, el estándar IEC 60034 presenta errores menores al del IEEE 112 B. Esto se debe a que propone un tratamiento más adecuado de las pérdidas en el hierro. Se concluye además que para ponderar correctamente los valores de eficiencia indicados en el catálogo de un motor debe conocerse el método de ensayo utilizado para su determinación. Los valores declarados por el fabricante, tal como se ha demostrado, pueden presentar pequeñas variaciones con la eficiencia que presentará un motor en condiciones de utilización nominales.

Anexo

Parámetros del motor utilizado en los ensayos.

Tamaño de carcasa	132S/B3
Año de fabricación	1996
R_s	2,72 Ω
$R_{r'}$	3,25 Ω
X_{ds}	1,53 Ω
$X_{dr'}$	1,53 Ω

Referencias

- [1] R. Saidur, "A Review on Electrical Motors Energy Use and Energy Savings", Elsevier. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14, pp. 877-898, 2010.
- [2] M. Melfi, S. Evon and R. Mcelveen, "Induction versus permanent magnet motor", IEEE Industry Applications Magazine. Nov/Dec 2009, pp. 28-35, 2009.
- [3] Official Journal of the European Union; "Commission Regulation (EC) No. 640/2009.
- [4] National Electrical Manufacturers Association; NEMA Standards Publication MG 1-2003 Motors and Generators, 2003.
- [5] IRAM. Etiquetado de eficiencia energética para motores de inducción trifásicos. IRAM de Emergencia 62405:2010.
- [6] Verucchi, C; Ruschetti, C. y G. Kazlauskas. "High Efficiency Electric Motors: Economic and Energy Advantages", IEEE Latinamerican Trans. Volume: 11, Issue: 6, Dec. 2013, pp 1326-1332. ISSN: 1548-0992.
- [7] C. Yung, "Tips for Improving Motor Efficiency, IEEE Industry App. Magazine. Nov./Dec. 2007, 12-20, 2007.
- [8] C. Yung, "Opportunities to Improve Reliability and Efficiency of Existing Medium-Voltage Electric Motors", Petroleum and Chemical Industry Conference, 2005. Industry Applications Society 52nd Annual, 199 – 208, 2005.
- [9] W. Cao and K. Bradley, "Assessing the Impacts of Rewind and Repeated Rewinds on Induction Motors: is an Opportunity for Re-designing the Machine Being Wasted?", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 42, no. 4, pp 958 - 964 , 2006.
- [10] He Zhang; Zanchetta, P.; Gerada, C.; Bradley, K.; Junyi Liu, "Performance evaluation of induction motor efficiency and in-service losses measurement using standard test methods" Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International , pp. 913-917, 2011.
- [11] Siddique, A.; Yadava, G.S.; Singh, B., "Effects of voltage unbalance on induction motors", Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 26-29, 2004.
- [12] G. Wallace, A.K.; von Jouanne, A.R.; Wiedenbrug, E.J.; Andrews, P.S.; Wohlgemuth, C.W.; Douglass, J.; Wainwright, "The measured effects of under-voltage, over-voltage and unbalanced voltage on the efficiency and power factor of induction motors over wide ranges of load", Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives, pp. 258-262, 1997.
- [13] Sen, P.K.; Landa, H.A., "Derating of induction motors due to waveform distortion", IEEE Transactions on Industry Applications, v. 26-6, pp. 1102-1107, 1990.
- [14] Fuchsloch, J., W. Finley and R. Walter (2008), The Next Generation Motor, IEEE Industry Applications Magazine, Jan/Feb 2008, 37-43.
- [15] Schwarz, K. (1964), Survey of Basic Stray Losses in Squirrel-cage Induction Motors, Proceedings of The Institution of Electrical Engineers, 11, 1565-1574.
- [16] Glew, C. (1998), Stray Load Losses in Induction Motors: a Challenge to Academia, Power Engineering Journal, Febrero 1998, 27-32.
- [17] IEEE Std 112, IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, 2004.
- [18] E. Agamloh ; "The repeatability of IEEE standard 112B induction motor efficiency tests", Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International; pp. 1119 – 1126; 2009.
- [19] IEC 60034-2-1: 2007 (BS EN 60034-2-1) Rotating Electrical Machines-Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests, 2007.

- [20] A. Fitzgerald, C. Kingsley y S. Umans, “Máquinas Eléctricas”, 6ta. Edición, McGraw-Hill, 2004.



Carlos Verucchi obtuvo el título de Ing. Electromecánico en 1994 en la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires y de Magister en Ciencias de la Ingeniería en la Universidad de Concepción, Chile, en 2000. Actualmente se desempeña como docente e investigador en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires y en el grupo de investigación en INTELYMEC (Investigación aplicada en electricidad y mecatrónica).



Cristian R. Ruschetti (S'11 - M'13) recibió el título de Ing. Electromecánico (2006) de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA) y el de Doctor en Ciencias de la Ingeniería (2012) de la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC), Argentina. Actualmente se desempeña como Investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Es miembro del Grupo INTELYMEC, de la UNCPBA y del Grupo de Electrónica Aplicada, de la UNRC. Sus temas de interés técnico son: el diseño de máquinas eléctricas y el análisis de dispositivos electromagnéticos utilizando el método de los Elementos Finitos.



Fernando Benger es Ingeniero Electromecánico graduado en la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA), Argentina en 1997. Actualmente se desempeña como investigador del grupo INTELYMEC, de la Facultad de Ingeniería de la UNCPBA. Sus áreas de interés son las máquinas eléctricas y la eficiencia energética.