



## APLICACIONES INDUSTRIALES

### Validación por modelos del motor agregado para caracterización energética

#### Validation for models of the aggregate motor for energy characterization

Ignacio – Romero Rueda<sup>1</sup>  
Ángel – Costa Montiel<sup>2</sup>

Bárbara Magdalena – PérezMena<sup>1</sup>  
Elieski – Cruz Martínez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM). Holguín. Cuba.

<sup>2</sup> Centro de Investigaciones y pruebas electro energética, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba.

#### RESUMEN/ABSTRACT

En este trabajo se expone la utilización del motor agregado en su aplicación a la caracterización energética de un gran número de motores conectados a una misma barra de baja tensión y se justifica y valida esta aplicación. Con ayuda del modelo de circuito equivalente se estableció un balance de potencia entre el motor equivalente y los motores individuales, lo cual permitió analizar su posible sustitución por un grupo de máquinas más eficientes y evaluar el ahorro en el consumo de energía de estos motores. Las variaciones en las magnitudes del motor agregado reflejaron cambios en las cargas de los motores individuales, con errores menores al 5 % con respecto al equivalente por suma, aún en presencia de cargas de diferentes características, que demostró la validez de utilizar un motor agregado para el análisis energético de grupos de motores individuales.

**Palabras clave:** balance de potencia, caracterización energética, modelo de motor agregado.

*This work developed and validated an aggregate motor model, justifying the conditions that should complete a group of connected motors to the same bus of electric power in low voltage, so that the motors can be aggregate in order to fulfil its energy characterization. Utilizing the equivalent circuit model, a power balance is made and a comparison between the equivalent motor and the individual motors, in order to analyse its possible substitution for a group of more efficient machines and to evaluate the saving in the energy consumption of these motors. The variations in the magnitudes of the aggregate motor reflected changes in the loads of the individual motors, with an error less than 5%, still in presence of loads of different characteristic demonstrating the validity of using a motor aggregate for the energy analysis of groups of individual motors.*

**Keywords:** balance of power, energy characterization, energy saving, aggregate motor model.

#### INTRODUCCIÓN

Los motores de inducción son los más altos consumidores de energía en el sector industrial y tienen un peso importante en el sector comercial y de los servicios.

Existen instalaciones que cuentan con alto número de motores inducción y se hace muy engorroso analizar el comportamiento de los mismos individualmente, para vencer esta dificultad se propuso el modelo del motor agregado [1, 2]. Generalmente se trabaja con modelos obtenidos en base a los parámetros nominales y es frecuente utilizarlo en análisis dinámicos [3, 4], no existe referencia al uso del mismo con fines energéticos. Las investigaciones en los sistemas eléctricos de potencia imponen los métodos de simulación pues la magnitud de las potencias de los equipos e instalaciones imposibilitan el método experimental e imponen la necesidad de utilizar métodos basados en la simulación por algoritmos computacionales. Sucede que, los parámetros y características de las máquinas eléctricas son muy diferentes para distintos valores de potencia nominal, por lo que una instalación experimental con motores medios o grandes no es posible por el elevado costo que representa, incluso para los países desarrollados.

La imposibilidad de tener a escala de laboratorio la diversidad de potencias nominales de motores existentes en la industria, hace cualquier demostración experimental limitada, por ello se realiza una validación del Modelo del Motor Agregado (MMA) a partir de modelos energéticos de motores que han sido comprobados con anterioridad por numerosos investigadores, y se extiende para toda la gama de motores de interés industrial y para muchas combinaciones posibles. Con este objetivo, se utilizan motores de características afines de los cuales se disponen sus datos de catálogo y, a través del método del circuito equivalente, se obtienen las características de funcionamiento del agregado y de los motores individuales.

Se plantea como objetivo, obtener la validación del motor agregado a partir de los modelos de simulación utilizados anteriormente por otros investigadores. Los parámetros principales que influyen en la obtención del modelo de motor agregado, de acuerdo con la diversidad de motores existentes a nivel industrial, son las siguientes: 1) potencia nominal; 2) cantidad de motores; 3) número de polos; 4) estado de carga; 5) tipo de eficiencia y 6) tiempo de explotación. La configuración del MMA encierra dependencias complejas e interrelacionadas, sin embargo, para demostrar su validez se toman como referencia las potencias de salida y de entrada, por ser resultados de un proceso de conversión electromecánica donde concurren variaciones en casi todas las magnitudes del motor agregado.

Para la validación por simulación se comparan los resultados que se obtienen tanto por el MMA como por el método de análisis individual a cada motor, con modelos demostrados ampliamente en trabajos anteriores [5]. Con este fin, las distintas magnitudes resultantes del grupo de motores deben mostrar un comportamiento sin diferencias apreciables en comparación con las respuestas del agregado [6, 7]. Esta validación se desarrolla en tres pasos:

- En primer lugar, se forman variantes de agregados de eficiencias estándar y alta, a partir de motores seleccionados por un catálogo de motores de inducción de baja tensión, que incluya motores de valores tipos de eficiencia, a través de las recomendaciones generales dadas en [8]. Tanto para los motores individuales como para el agregado se determinan los parámetros del circuito equivalente por [9].
- En segundo lugar, a través del coeficiente de carga de los motores individuales se establecen las potencias de salida correspondientes y, con la suma de estas, el coeficiente de carga del agregado. A partir del deslizamiento, en función del coeficiente de carga, se obtiene un circuito equivalente con impedancia variable, lo cual permite determinar las características de funcionamiento para los motores individuales y para el agregado.
- En tercer lugar, se determinan las sumatorias de las magnitudes representativas de cada grupo de motores individuales del agregado, se comparan versus las mismas magnitudes obtenidas directamente por el equivalente y se representan en formas de tablas y gráficas. Las diferencias entre estas magnitudes, su comportamiento típico y variaciones que experimentan, son las bases para la validación del método propuesto para caracterización energética.

En la etapa de la validación del MMA se consideran variables que no pueden ser evaluadas bajo consideraciones reales, como son: el tipo de eficiencia y el número de motores en el agregado.

Existen numerosas investigaciones sobre la caracterización de motores asíncronos de baja tensión en el sector industrial [4, 10, 11]. En la Unión Europea se realizó un trabajo donde se caracterizan los motores de inducción de acuerdo con los niveles de potencias referidos a: porcentaje que representan en capacidad instalada y en el consumo de energía, horas de trabajo anuales y el incremento del costo anual, trabajo que sirvió de base en la elección de las máquinas para las diferentes combinaciones de motores agregados [8]. Se pueden clasificar los diferentes tipos de motores agregados de acuerdo con las potencias de los motores de inducción que lo integran. En este trabajo se hace una división en cuatro grandes grupos: agregados con motores de inducción de iguales potencias; agregados con motores de inducción de potencias similares; agregados con motores de inducción de potencias diferentes y agregados con motores de inducción de potencias muy diferentes.

## **DESARROLLO**

### **Formación de motores agregados típicos**

Los datos nominales de los motores trifásicos de inducción de baja tensión se tomaron de un catálogo, de acuerdo con el rango de potencias de 1 a 375 kW, de 2 a 6 polos, eficiencia estándar y alta, para derivar en las cuatro variantes de agregado.

Se pueden clasificar los motores agregados de acuerdo con las potencias de los motores de inducción que lo integran. En este trabajo se hace una división en cuatro grandes grupos: *agregados con motores de inducción de iguales potencias*; *agregados con motores de inducción de potencias similares*; *agregados con motores de inducción de potencias diferentes* y *agregados con motores de inducción de potencias muy diferentes*. Los motores agregados permiten obtener los datos nominales de las 16 variantes, recogidas en cuatro tipos de potencias (tabla 1). Los agregados de igual potencia se diferencian por las corrientes, velocidades, factores de potencias, eficiencias, deslizamientos y, en menor grado, por el número de pares de polos. Los motores de eficiencia estándar y de alta eficiencia se diferencian fundamentalmente en los valores del rendimiento y la velocidad.

**Tabla 1.** Datos nominales de los motores agregados

No		$P_n$ (kW)	$n_n$ (r/min)	$fp_n$	$\eta_n$
PI	EE	447	1775	0,87	0,93
	AE	447	1775	0,86	0,93
PD	EE	447	1771	0,86	0,91
	AE	447	1776	0,84	0,93
PI	EE	220	1765	0,84	0,91
	AE	220	1765	0,86	0,93
PD	EE	220	1761	0,86	0,90
	AE	220	1767	0,80	0,92
PI	EE	525	1776	0,87	0,93
	AE	525	1781	0,87	0,95
PD	EE	525	1779	0,88	0,93
	AE	525	1781	0,88	0,94
PI	EE	920	3568	0,87	0,93
	AE	920	3570	0,93	0,94
PD	EE	920	1780	0,86	0,93
	AE	920	1783	0,90	0,95

Nota: PI Polos iguales; PD Polos diferentes; EE Eficiencia; Estándar y AE Alta Eficiencia

Existen varios procedimientos que determinan los parámetros del circuito equivalente a partir de los datos nominales [5, 12], aquí se utiliza el método descrito en [9], que incluye la resistencia adicional como un aporte a la consideración del agregado para fines energéticos.

### Coefficiente de carga del agregado y los motores individuales

Para tener en cuenta el estado de carga, en condiciones reales, se establece el coeficiente de carga ( $k_c$ ) [13]. La velocidad varía con el grado de carga del motor de inducción y se refleja en el deslizamiento del mismo, modificando la impedancia total y las magnitudes que caracterizan al motor en régimen estacionario. Los coeficientes de cargas de cada motor que integran al agregado se asumen de forma aleatoria, (ver tabla 2). Las columnas  $kc_{m1}$ ,  $kc_{m2}$  y  $kc_{m3}$  fijan un mismo valor para todos los motores de inducción y por tanto determina el comportamiento del agregado bajo estas condiciones y las columnas  $kc_{m4}$ ,  $kc_{m5}$  y  $kc_{m6}$  sitúan un valor de carga, que oscila de 50 a 125 %.

**Tabla 2.** Coeficientes de carga por motor individual

	$kc_{m1}$	$kc_{m2}$	$kc_{m3}$	$kc_{m4}$	$kc_{m5}$	$kc_{m6}$
Motor 1	0,900	0,700	0,500	0,948	1,034	0,801
Motor 2	0,900	0,700	0,500	0,965	0,876	1,019
Motor 3	0,900	0,700	0,500	0,923	0,637	0,487
Motor 4	0,900	0,700	0,500	0,641	0,625	0,801
Motor 5	0,900	0,700	0,500	0,721	0,960	0,621
Motor 6	0,900	0,700	0,500	0,901	0,997	0,947
Motor 7	0,900	0,700	0,500	0,516	0,834	0,565
Motor 8	0,900	0,700	0,500	0,516	0,603	0,715
Motor 9	0,900	0,700	0,500	0,612	0,503	0,686
Motor 10	0,900	0,700	0,500	0,765	0,953	0,946

Si se expresa la potencia en el eje de cada motor  $i$  a través del coeficiente de carga  $k_{ci}$  y la potencia nominal  $P_{ni}$ , se obtiene el coeficiente de carga para el agregado  $k_{cag}$  por la ecuación (1):

$$k_{cag} = \frac{\sum_{i=1}^n k_{ci} P_{ni}}{\sum_{i=1}^n P_{ni}} \quad (1)$$

Si todos los motores de inducción individuales tienen un mismo coeficiente de carga, para el motor agregado le corresponde el mismo valor y  $k_{cag} = k_{ci}$ .

Los motores agregados que se obtienen por este procedimiento se caracterizan por los datos nominales, comparables a motores reales para las mismas potencias, como se demuestra en [3].

Los valores del coeficiente de carga, que se obtienen, para los motores agregados (tabla 3), coinciden para los agregados de eficiencia estándar y alta, ya que los mismos dependen de la potencia en el eje real y de la potencia nominal, y dada la igualdad en potencia de cuatro motores, se pueden agrupar en cuatro grupos.

**Tabla 3.** Coeficientes de cargas por motor agregado

Agregados	$kc_{ag1}$	$kc_{ag2}$	$kc_{ag3}$	$kc_{ag4}$	$kc_{ag5}$	$kc_{ag6}$
1-2-3-4	0,90	0,70	0,50	0,75	0,80	0,75
5-6-7-8	0,90	0,70	0,50	0,75	0,82	0,76
9-10-11-12	0,90	0,70	0,50	0,67	0,77	0,79
13-14-15-16	0,90	0,70	0,50	0,66	0,75	0,78

Cuando todos los motores individuales tienen el mismo coeficiente de carga, el coeficiente de carga del motor agregado coincide con el de cada motor individual. Si los motores que integran el agregado tienen diferentes estados de cargas, el coeficiente de carga del motor agregado no tiene un valor definido por ley. Para realizar una comparación del motor agregado con la suma de las magnitudes de los motores de inducción, a cada motor individualmente se le aplicó una carga simulada a través del coeficiente de carga y la potencia nominal. La carga del motor agregado resulta la suma de las potencias reales del conjunto de motores individuales, y bajo estas condiciones se determina el comportamiento del equivalente.

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

A continuación, se realiza un análisis según los cuatro tipos de motores agregados propuestos:

### **Agregados con motores de inducción de iguales potencias**

Cuando el número de polos es diferente, siempre existe una diferencia de potencia, aunque despreciable. Estas diferencias son mayores para motores de eficiencia estándar, y si se comparan para coeficientes de cargas fijos su magnitud varía inversamente al estado de carga. Cuando el coeficiente de carga se toma aleatoriamente para cada motor individual, manteniendo las demás condiciones, las mayores diferencias se obtienen para motores de alta eficiencia.

### **Agregados con motores de inducción de potencias similares**

Cuando todos los motores de inducción tienen el mismo número de pares de polos e iguales coeficientes de carga, existe una diferencia de potencias a la entrada menor, comparada con la existente para el caso de motores con diferentes números de polos.

En este tipo de motor agregado resultan mejor caracterizadas las combinaciones para motores estándares con iguales número de polos y motores de alta eficiencia con diferentes números de polos.

### **Agregados con motores de inducción de potencias diferentes**

Cuando todos los motores de inducción tienen el mismo número de pares de polos e iguales coeficientes de carga, las diferencias de potencias a la entrada para los motores de eficiencia estándar resultan mucho menores, comparada con la existente para el caso de motores de alta eficiencia. En este tipo de motor agregado resultan mejor caracterizadas las combinaciones para motores estándares y de alta eficiencia con diferentes números de polos.

### **Agregados con motores de inducción de potencias muy diferentes**

En este tipo de motor agregado resultan mejor caracterizadas las combinaciones para motores estándar con iguales y diferentes números de polos. Se mantiene el mismo comportamiento que para el caso de agregados formados con motores de inducción diferentes.

Una vez que se ha realizado el análisis particular para los diferentes tipos de agregados, se generalizan y analizan los resultados.

### **Resultados generalizados para todos los agregados**

Para todos los grupos de agregados los valores de las diferencias de potencias de entrada (DPE) no alcanzan el 1%, bajo cualquier circunstancia de operación del motor agregado; y cuando se fija el coeficiente de carga para todos los motores individuales, la DPE varía inversamente con el coeficiente de carga. La diferencia de eficiencia (DEF) prácticamente repite los resultados vistos para la DPE, en ningún caso supera el 1% bajo cualquier circunstancia de operación del motor agregado. La diferencia de corriente del estator tiene una dependencia no lineal de la carga y los valores son superiores a los de otras magnitudes, sin embargo, no exceden del 1,5 % comparados con el equivalente por suma.

Por último, se presentan las diferencias entre las pérdidas totales del motor agregado comparadas con la equivalente del grupo de motores individuales. Las pérdidas totales tienen una dependencia compleja versus el grado de carga del motor y por ello toman valores mayores a los vistos para magnitudes de menor complejidad en sus dependencias. Solo para la DPT los límites de variaciones de los valores mínimos, medios y máximos de las magnitudes analizadas, como promedio general, sobrepasan el 1 %, sin embargo, es menor del 5 % en todos los casos (ver tabla 4), tomado como criterio básico el expresado para la exactitud en [8]. Estos resultados justifican el empleo del motor agregado para determinar el comportamiento energético de un grupo de motores de inducción.

**Tabla 4.** Variaciones de los valores mínimos, medios y máximos de diferentes magnitudes

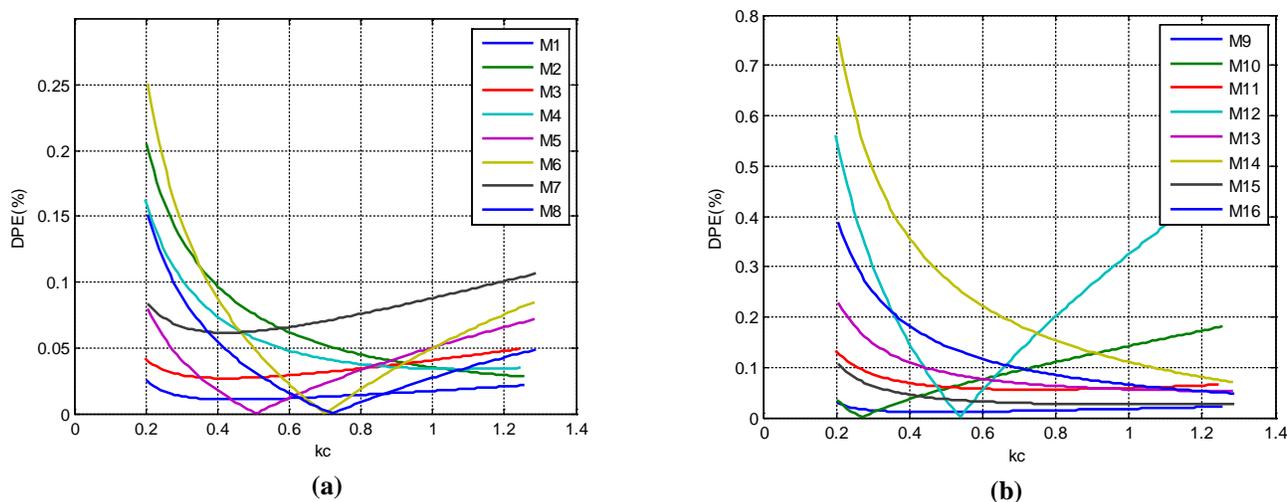
Criterios	Valores límites de las diferentes magnitudes			
	DPE (%)	DEF (%)	DCE (%)	DPT (%)
Rango de mínimos	0 – 0,044	0 – 0,021	0 – 0,082	0 – 0,448
Rango de medios	0,087 – 0,334	0,02 – 0,131	0,171 – 0,529	0,776 – 2,916
Rango de máximos	0,269 – 0,819	0,051 – 0,389	0,467 – 1,312	2,439 – 7,809
Promedio general	0,205	0,077	0,355	1,929

### Resultado integral de agregados para diferencias de potencias de entradas

Cuando los coeficientes de carga de todos los motores individuales son iguales, se obtiene ese mismo valor para el motor agregado, y las diferencias de potencias varían inversamente proporcional con este coeficiente. La dependencia de la DPE versus el coeficiente de carga promedio por tipos de eficiencia, permite sacar conclusiones sobre la influencia de este parámetro en la equivalencia del agregado con el grupo de motores de inducción, y en qué rango de carga se comporta con más efectividad, ver la figura 1, donde M1 hasta M16 son los motores agregados resultantes de las diferentes combinaciones. Para ello se asignan coeficientes de carga diferentes en orden ascendente desde 0,2 hasta 1,25 a cada motor perteneciente al agregado; para generar estos valores se forma una matriz donde las filas representan los motores individuales y las columnas la cantidad de coeficientes a considerar (ecuación 2):

$$k_c(I; J) = [(0,2 \div 1,25)(0,88 + 0,2 \cdot \text{rand}(1;1))] \quad (2)$$

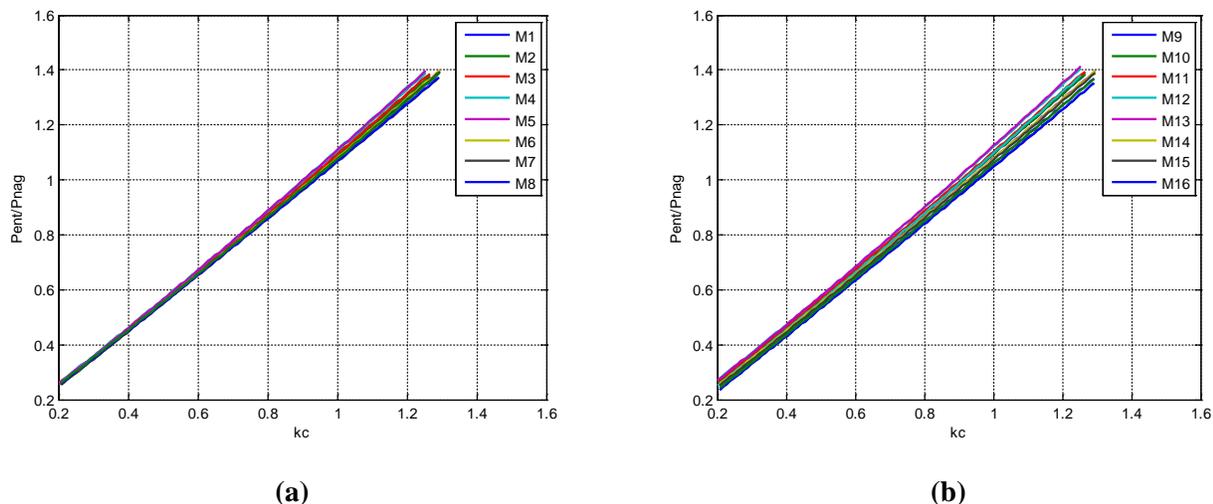
De la figura 1, se deduce que: 1) los valores de DPE, de forma general, son más bajos y presentan menor dispersión para motores de eficiencia estándar que en motores de alta eficiencia; 2) para coeficientes de carga entre 80 y 90 % los valores de DPE disminuyen, coincidente con la ocurrencia de la máxima eficiencia de los motores de inducción en estas zonas de carga.



**Fig. 1.** Diferencias de potencias de entrada (DPE): a) para eficiencia estándar; b) para alta eficiencia.

### Comportamiento gráfico de diferentes magnitudes para motores agregados

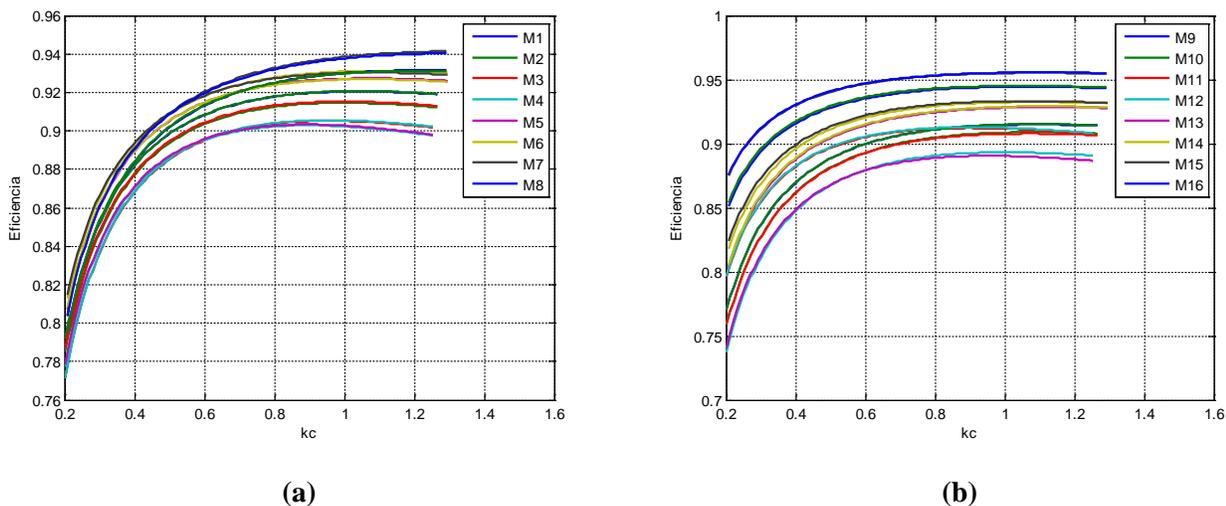
En cada figura se representa la dependencia de la magnitud específica que se obtiene por el agregado y la obtenida por la equivalencia del grupo de motores individuales. Los motores de eficiencia estándar abarcan un espectro menor en valores relativos que para alta eficiencia, figura 2. Esto significa mayor correspondencia con el grupo de motores individuales para cualquier rango de potencia que se analice.



**Fig. 2. Potencia de entrada para motores: (a) de eficiencia estándar; (b) de alta eficiencia.**

Debido a la pequeña diferencia entre las mismas magnitudes para cada tipo de motor agregado, prácticamente ambas representaciones se funden en una sola curva.

La eficiencia para motores estándares toma valores de 0,76 hasta 0,94 y se mantiene el menor espectro en motores de eficiencia estándar, figura 3.



**Fig. 3. Eficiencia: (a) para eficiencia estándar; (b) para alta eficiencia.**

La corriente del estator muestra un comportamiento similar a la potencia de entrada, solo con una menor pendiente y se observa la dependencia cuadrática del comportamiento de la corriente del estator para bajo estados de cargas; para régimen, cercano al nominal se verifica una dependencia lineal con respecto al nivel de carga, figura 4.

Tanto los resultados numéricos representados de formas tabuladas como las dependencias gráficas, evidencian bajos niveles de errores y una alta correspondencia de las características del motor agregado con un motor de inducción equivalente para la potencia específica. Estas demostraciones sirven para justificar que el motor agregado representa al conjunto de motores de inducción y determina el comportamiento energético del grupo.

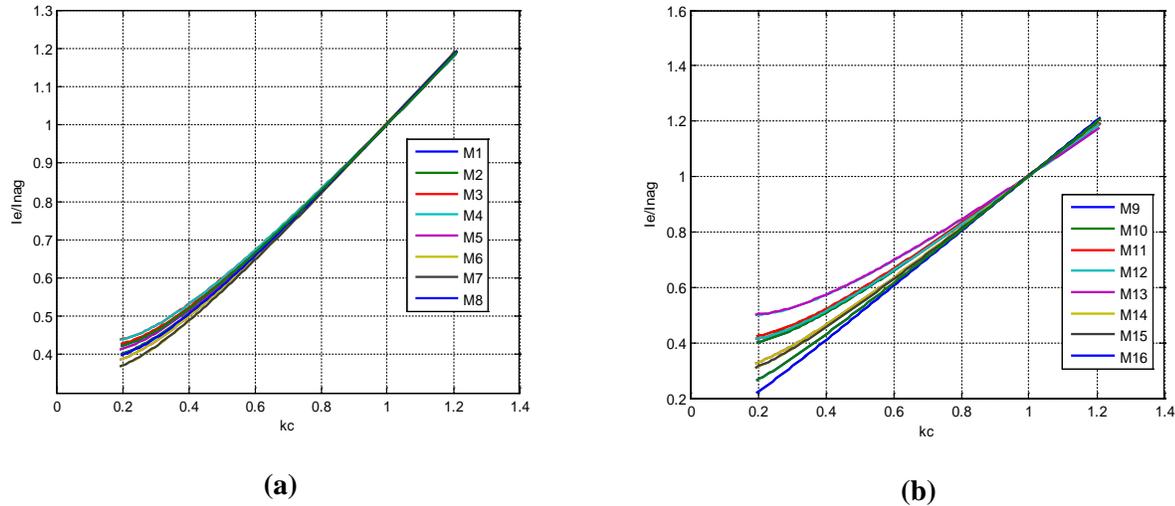


Fig. 4. Corriente del estator: (a) para eficiencia estándar; (b) para alta eficiencia.

## CONCLUSIONES

- Los errores cometidos al considerar el motor agregado como sustitutivo, desde el punto de vista energético, de los motores individuales que lo componen, son menores del 2%.
- Las diferencias de potencias de entrada (DPE) son menores del 1 % y presentan los valores más bajos para agregados constituidos por motores de eficiencia estándar; esta magnitud decrece a medida que aumenta el factor de carga, alcanza los mínimos entre 80 y 90 %, para un número constante de motores. La DPE se incrementa con el aumento de los motores en el agregado y se mantiene su disminución cuando aumenta el factor de carga.
- Existe una alta correspondencia de las características del motor agregado con un motor de inducción ordinario para la potencia específica, según lo demuestran los resultados numéricos y las características obtenidas de forma gráfica, donde se evidencian bajos niveles de errores, que demuestra la validez de utilizar un motor agregado para el análisis energético de grupos de motores individuales.

## REFERENCIAS

- [1] Louie, K.-W., "A new way to represent the aggregate effects of induction motors at a same bus in a power system". *International Journal of Applied Science and Engineering Int. J. Appl. Sci. Eng.*, 2006, vol. 4, no. 1, p. 91-102. ISSN 1727-2394.
- [2] Aree, P., "Aggregating method of induction motor group using energy conservation law". *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*, 2014, vol. 12, no. 1, p. 1-6. ISSN 1685-9545.
- [3] Pedra, J.; Sainz, L. y Córcoles, F., "Study of aggregate models for squirrel-cage induction motors". *Power Systems, IEEE Transactions on*, 2005, vol. 20, no. 3, p. 1519-1527. ISSN 0885-8950.
- [4] Aree, P., "Impacts of small and large induction motors on active and reactive power requirement and system loadability". In *Proceedings of the Electrical Engineering Congress (iEECON), 2014 International*, Chonburi 19-21 March 2014 IEEE, 1- 4. DOI 10.1109/iEECON.2014.6925854
- [5] Yamazaki, K.; Suzuki, A.; et al., "Circuit Parameters Determination Involving Stray Load Loss and Harmonic Torques for High-Speed Induction Motors Fed by Inverters". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2013, vol. 28, n. 1, p. 154-163. ISSN 0885-8969. DOI 10.1109/TEC.2012.2227058
- [6] Zhang, G.; Du, Z.; et al., "Nonlinear model reduction-based induction motor aggregation". *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2016, vol. 26, n. 2, p. 398-411. ISSN 2050-7038. DOI 10.1002/etep.2089

- [7] Saxena, N. K. y Sharma, A. K., "Estimation of composite load model with aggregate induction motor dynamic load for an isolated hybrid power system". *Frontiers in Energy*, 2015, vol. 9, n. 4, p. 472-485. ISSN 2095-1698. DOI 10.1007/s11708-015-0373-7
- [8] De Almeida, A.; Bertoldi, P. y Leonhard, W., "Energy efficiency improvements in electric motors and drives". Springer Science & Business Media, 2012. ISBN 3642608329.
- [9] Romero, I. y Pérez, B., "Algoritmo para la determinación de los parámetros del motor de inducción por datos nominales". *Energética*, 2008, vol. XXIX, n. 3, p. 10-17. ISSN 1815-5901.
- [10] Collin, A. J.; Tsagarakis, G.; et al., "Development of low-voltage load models for the residential load sector". *Power Systems, IEEE Transactions on*, 2014, vol. 29, n. 5, p. 2180-2188. ISSN 0885-8950.
- [11] Santhosh Kumar, D. y Sharmina, O. T., "Efficiency Improvement of Three Phase Induction Motor Using Artificial Intelligent Technique". *International Journal of Advanced Research*, 2014, vol. 2, n. 4, p. 474-483. ISSN 2320-5407.
- [12] Kaplon, A.; Utrata, G. y Rolek, J., "Estimators of induction motor electromechanical quantities built on the basis of a machine secondary multi-loop equivalent circuit". *Archives of Electrical Engineering*, 2014, vol. 63, n. 2, p. 149-160. ISSN 2300-2506.
- [13] Siraki, A. G.; Pillay, P. y Angers, P., "Full load efficiency estimation of refurbished induction machines from no-load testing". *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 2013, vol. 28, n. 2, p. 317-326. ISSN 0885-8969.

## AUTORES

### **Ignacio Romero Rueda**

Ingeniero Eléctrico, Doctor en Ciencia, Profesor Auxiliar, Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM). Holguín. Cuba

E-mail: [iromero@ismm.edu.cu](mailto:iromero@ismm.edu.cu), [iromero1027@gmail.com](mailto:iromero1027@gmail.com)

### **Ángel Costa Montiel**

Ingeniero Eléctrico, Doctor en Ciencia, Profesor titular, Centro de Investigaciones y pruebas electro energética, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba.

E-mail: [angel.costa.montiel@gmail.com](mailto:angel.costa.montiel@gmail.com)

### **Bárbara M. Pérez Mena**

Ingeniera Eléctrica, Master en Ciencia, Profesora Asistente, Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM). Holguín. Cuba.

E-mail: [bperez@ismm.edu.cu](mailto:bperez@ismm.edu.cu)

### **Elieski Cruz Martínez**

Ingeniero Eléctrico, Profesor Instructor, Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM). Holguín. Cuba,

E-mail: [ecruz@ismm.edu.cu](mailto:ecruz@ismm.edu.cu)