



## TRABAJO TEORICO-EXPERIMENTAL

### Procedimiento para la evaluación energética y sustitución de motores sincrónicos por asincrónicos

#### Procedure for energy evaluation and substitution of synchronous motors for asynchronous

Nilka - Hernández Dieguez<sup>1</sup>  
Ignacio - Romero Rueda<sup>1</sup>

Orlando - Graña Alarcón<sup>2</sup>  
Yetsy - Silva Cala<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Empresa Ernesto Che Guevara (ECG). Moa, Holguín, Cuba.

#### RESUMEN/ABSTRACT

Este trabajo tiene como propósito exponer un procedimiento que evalúa energéticamente motores sincrónicos en servicio a nivel industrial para ser sustituidos por motores asincrónicos. El procedimiento utiliza el método del momento en el entrehierro modificado, como alternativa común para la evaluación de ambos tipos de motores. Se incorpora la evaluación económica de acuerdo con el método del costo del ciclo de vida y la influencia de los motores en la potencia reactiva del lugar de la sustitución. La implementación del procedimiento en motores sincrónicos facilita la información técnica y económica para el desarrollo de programas de sustitución de motores en la industria y el cual reportó un ahorro energético anual de 5,02 MWh conforme al funcionamiento estimado de los motores asincrónicos seleccionados, el reactivo demandado por los motores seleccionados, incrementa el reactivo en un 4,5 % lo que modifica el factor de potencia a 0,98.

**Palabras clave:** evaluación de eficiencia en el campo, momento en el entrehierro, motor sincrónico.

*This work has as purpose to expose a procedure that evaluates synchronous motors energetically in service at industrial level to be substituted by asynchronous motors. The procedure uses the air gap torque method, as common alternative for the evaluation of both types of motors. It incorporates the economic evaluation of agreement with the method of the cost of the cycle of life and the influence of the motors in the reactive power of the place of the substitution. The implementation of the procedure in synchronous motors facilitates the technical and economic information for the development of a program of substitution of motors in the industry and it reported an annual energy saving of 5,02 MWh according to the desired operation of the selected asynchronous motors, the reactive power demanded by the selected motors, it increases the reactive power in 4,5 %, what modifies the power factor at 0,98.*

**Key words:** air gap torque, evaluation of efficiency at the field, synchronous motor.

#### INTRODUCCIÓN

En las industrias y otros sectores es común encontrar motores sincrónicos en servicio a los cuales nunca se les han evaluado sus características operacionales tomando en consideración las exigencias de las cargas que accionan.

Por lo general estas máquinas tienen un régimen de funcionamiento continuo lo que influye en el deterioro de las condiciones mecánicas y eléctricas de estos, así como el incremento del consumo específico de energía y del tiempo de avería. Es por ello que cada día resulta más urgente la aplicación de medidas que conduzcan al ahorro de energía eléctrica para lograr reducciones de costos de producción. Todo proyecto de reubicación y sustitución de motores difícilmente puede considerarse completo sin una evaluación de la eficiencia de los motores en estudio. En el presente trabajo se desarrolla un procedimiento que utiliza el Método del Momento en el Entrehierro Modificado en la evaluación técnica y energética de las posibilidades de sustitución de motores sincrónicos por asincrónicos y que incorpora la selección de este último.

En la evaluación de la eficiencia del motor de inducción se han estudiado varios métodos. Los métodos más simples; datos de chapa, corriente y deslizamiento son fáciles de aplicar, pero pueden conducir a errores apreciables si se considera que la eficiencia de chapa, además de ser el resultado del tratamiento estadístico de un lote de motores, no se mantiene constante en todo el rango de operación. La corriente se comporta no lineal y el deslizamiento correspondiente a los valores nominales puede presentar un 20 % de desviación según fabricantes [1]. Los métodos de segregación de pérdidas están diseñados para medir directamente las pérdidas en el motor y en principio deben arrojar resultados precisos, sin embargo, el método IEEE-112 E no es útil pues incluye retirar el rotor y hacer pruebas especiales para determinar las pérdidas adicionales. El método del circuito equivalente (basado en el método F de la norma IEEE-112-2004 se fundamenta en el conocimiento de los parámetros del circuito que modela el comportamiento de estado estable del motor asincrónico, lo cual constituye su principal inconveniente en un ambiente industrial, por los ensayos que requiere.

El uso de este método para determinar las pérdidas, las características operacionales y la eficiencia del motor, radica en las posibilidades de predecir el comportamiento para cualquier estado de carga [2]. Se debe tener en cuenta que los valores de las impedancias pueden variar mucho entre la condición de rotor estático y la condición de operación en vacío de la máquina. Muchos autores coinciden que el método del momento en el entrehierro es uno de los métodos de campo existentes para estimar la eficiencia con bajo nivel de intrusión. En general existen numerosos métodos para la determinación de la eficiencia en motores eléctricos, pero estándares básicos con los cuales se realizan pruebas en la determinación de la eficiencia en motores sincrónicos solo se tiene la IEEE 115 y la IEC 60034-2-1 donde se establecen las consideraciones para la evaluación de la eficiencia en máquinas sincrónicas a nivel de laboratorio [3, 4]. La norma IEC 60034-2-1 presenta diferencia con la IEEE-115, principalmente en la forma de determinar las pérdidas adicionales [5]. La norma JEC-37 empleada en Japón y otros países asiáticos se caracteriza por despreciar totalmente las pérdidas adicionales.

De los métodos desarrollados para la estimación de la eficiencia el más atractivo para el motor sincrónico resulta el método del momento en el entrehierro modificado dado que solo depende de las magnitudes en los terminales del estator y la información de los datos de placas para estimar la eficiencia, mientras el motor está en servicio. Los otros métodos, aunque permiten obtener el grado de carga [6], requieren de un personal calificado y dedicado exclusivamente a ellos, industrialmente no realizables. La aplicación del método del torque en el entrehierro modificado en los motores sincrónicos requiere de las mediciones de las corrientes de fase y tensiones de línea, resistencia del devanado del estator, las pérdidas en el acero pacero, pérdidas por fricción y batimiento del aire p<sub>fw</sub> y las pérdidas adicionales del rotor. Estas mediciones se realizan sin perturbar el proceso productivo. Tratándose de motores sincrónicos la particularidad de la aplicación del método esta fundamentalmente en la determinación de las pérdidas y las resistencias del devanado del estator. Los métodos analizados difieren considerablemente de un motor a otro a excepción del método del momento en el entrehierro modificado que permite la evaluación energética tanto en motores sincrónicos como asincrónicos debido a la construcción electromagnética que es igual para ambos motores.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Método del momento en el entrehierro

Varios experimentos a lo largo del tiempo han verificado el método del momento en el entrehierro (MME) y han concluido que el mismo es efectivo para estimar la eficiencia [7, 8]. La potencia de entrada del motor es calculada por la tensión y la corriente de línea, y la potencia de salida por la velocidad y el momento en el eje, por tanto, requiere de las mediciones de tensiones de líneas, corrientes de fases, velocidad del rotor y resistencia del devanado del estator. Adicionalmente, para medir las pérdidas en el acero  $p_{acero}$  y las pérdidas por fricción y batimiento del aire  $p_{fw}$ , es necesario un ensayo en vacío, lo cual constituye una de las dificultades de este método.

Para minimizar estas dificultades y convertir el MME en una técnica no invasiva, la ecuación se desarrolla con transformaciones en la concepción original, de donde surge el método del momento en el entrehierro modificado (MMEM), que mantiene una precisión satisfactoria y reduce grandemente el nivel de intrusión [9, 10]. La potencia ( $p_{ent}$ ) en términos de tensiones de líneas y corrientes de fases se calcula siempre que las componentes de corriente directa no estén presentes en las señales de tensión y corriente. Lu, *et al.* (2005) presenta un resumen de las transformaciones de potencia en el motor de inducción y el sistema de referencia en los ejes  $dq$  en la aplicación del

método del momento en el entrehierro [10]. Cuando el momento se desarrolla para un sistema de referencia estacionario por las magnitudes trifásicas se obtiene la ecuación (1), ampliamente utilizada en la literatura [9, 10].

$$M_{em} = \frac{\sqrt{3} p}{6} \left\{ \begin{aligned} &(2i_a + i_b) \int [v_{ab} - R_s (i_a - i_b)] dt \\ &+ (i_a - i_b) \int [v_{ca} + R_s (2i_a + i_b)] dt \end{aligned} \right\}, \quad [\text{Nm}] \quad (1)$$

donde:  $p$  es el número de polos del motor;  $i_a$ ,  $i_b$  las corrientes instantáneas de las fases A y B en A;  $R_s$  resistencia del devanado del estator en  $\Omega$ ; y  $v_{ab}$ ,  $v_{ca}$  tensión de líneas AB y CA en V. La ecuación de momento electromagnético modificado empleado en el procedimiento sólo requiere de las corrientes de dos fases  $i_a$  y  $i_b$ , y las tensiones de líneas  $v_{ab}$  y  $v_{ca}$  [11, 12]. La eficiencia  $\eta$  está dada por la ecuación (2), donde:  $P_{eje}$ : potencia de salida en el eje en W,  $M_{eje}$ : momento en el eje en  $N_m$ ,  $\omega_r$ : velocidad del rotor en rad/s,  $p_{fwn}$ : pérdidas mecánicas y del núcleo en W y  $p_{adr}$ : pérdidas adicionales del rotor con la carga en W.

$$\eta = \frac{P_{eje}}{P_{ent}} = \frac{M_{eje} \omega_r}{P_{ent}} = \frac{M_{em} \omega_r - p_{fwn} - p_{adr}}{P_{ent}} \quad (2)$$

La implementación del MEMM requiere de un algoritmo computacional, para su aplicación ver anexo A; además del gran volumen de cálculos y operaciones complejas que encierra, facilita obtener la información adecuada y necesaria evitando el uso de costosos y complejos sensores en condiciones de campo. Para implementar el algoritmo de cálculo del MME se requiere de un trabajo previo con las bases de datos para ser interpretado por la aplicación computacional:

- Tomar los datos nominales característicos de los motores sincrónicos.
- Tomar las mediciones de velocidad, solo para el motor asincrónico.
- Tomar las mediciones de frecuencia y las formas de ondas de tensión y de corriente.
- Salvar las mediciones y los datos nominales.

En el algoritmo se incorpora la selección de la potencia de los motores asincrónicos para el servicio continuo, en este caso la potencia se puede considerar directamente proporcional al momento y se aplica el método de la potencia equivalente [9]. También se añade la evaluación económica por el método del costo del ciclo de vida, como una alternativa [13].

### Influencia del motor asincrónico seleccionado en el reactivo de la empresa

Para determinar la influencia en el reactivo de la empresa se partirá de los datos globales de generación y uso de la potencia reactiva, restando de esta la correspondiente a motores sincrónicos e insertando la que necesitan los motores asincrónicos según la ecuación (3).

$$Q = Q_{empresa} - Q_{ms} + Q_{ma} \quad (3)$$

donde:  $Q$  es la potencia reactiva considerando la sustitución;  $Q_{empresa}$  es la potencia reactiva total de la empresa sin considerar la sustitución;  $Q_{ms}$  es la potencia reactiva que aportaban los motores sincrónicos que son sustituidos y  $Q_{ma}$  es la potencia reactiva que se adiciona por los motores asincrónicos que se instalarán.

El nuevo factor de potencia de la empresa se obtiene por la ecuación (4), despreciando las diferencias de pérdidas de potencia activa que genera la sustitución del accionamiento.

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (4)$$

Con este valor se analiza si existe la necesidad de incrementar la generación de potencia reactiva o es asumible por la capacidad instalada en motores sincrónicos.

### Procedimiento para la evaluación energética de la sustitución del accionamiento

El procedimiento a seguir para la evaluación energética de la sustitución de motores sincrónicos por asincrónicos se resume en los siguientes puntos:

1. Seleccionar las barras donde se desarrolla el trabajo.
2. Tomar los datos nominales de los motores sincrónicos.
3. Tomar las mediciones de las formas de ondas de tensiones y corrientes en el alimentador.
4. Aplicar el MMEM para adaptar el motor sincrónico a las condiciones reales existentes en el campo de las mediciones.
5. A partir de los resultados individuales por cada motor, seleccionar los motores asincrónicos.
6. Evaluar la influencia del grupo de motores seleccionado en el reactivo de la empresa.

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

El procedimiento se implementó en motores sincrónicos de características similares, pero solo se presentan los resultados para un motor, debido a la similitud del comportamiento obtenido de los restantes motores en funcionamiento. Los registros de las mediciones se realizaron a intervalos máximos de 15 min, durante las 24 h y tomando en cada registro las formas de ondas con 64 muestras por ciclo. Esto garantizó un adecuado muestreo y la conservación de las particularidades y propiedades de las magnitudes medidas. Con las formas de ondas, también se registraron los valores efectivos de tensiones y corrientes, la potencia activa trifásica total, el factor de potencia, la frecuencia.

Las mediciones utilizadas resumen 24 h de registro para obtener un gráfico de carga de un día típico de trabajo de la empresa y son resultados de promedios de mediciones a lo largo de varias semanas. La base de datos se elabora en formato de estructura por la ecuación (5), para ser interpretada por la aplicación computacional.

$$DE1 = struct('DO',[DO], 'Df',[Df], 'Dnr',[Dv], 'DN', [def]) \quad (5)$$

donde:  $[DO]$  = matriz formas de ondas de tensiones y corrientes;  $[Df]$  = matriz frecuencia;  $[Dv]$  = matriz velocidad;  $[def]$  = celda de datos nominales de los motores sincrónicos en evaluación. Las características de funcionamiento de los motores sincrónicos en evaluación pertenecientes a la barra de media tensión obtenidas a través del MMEM se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1.** Datos operacionales del motor sincrónico en evaluación

Parámetros	Simbología	UM	Reales	Nominales
Tensión valor promedio	V1	V	6303,76	6300,00
Corriente valor promedio	Is	A	62,60	71,40
Potencia aparente	VA	kVA	684,68	779,08
Potencia reactiva	Qs	kVAr	-272,15	-339,59
Potencia activa entrada	P1	kW	628,26	701,17
Potencia promedio en el eje	P2	kW	591,17	630,00
Pérdidas medias totales	Zp	kW	37,09	71,17
Eficiencia media	Ef	pu	0,94	0,90
Factor de potencia medio	Fp	pu	-0,92	-0,90
Velocidad media del rotor	Nr	rpm	900	900
Momento medio en el eje	M2	Nm	6272,99	6685
Momento máximo	Mm	Nm	6316,48	13370
Coefficiente de Carga	kc	pu	0,94	

Los datos operacionales de los motores tienen un comportamiento similar, debido a la similitud en el modo de funcionamiento que presentan; la corriente promedio del estator está cerca de su valor nominal, dado por un coeficiente de carga de 94 %; operan con un factor de potencia en adelanto de 0,92; dejando posibilidad de incremento de 60 kVAr en la potencia reactiva, este incremento es posible por datos nominales, sin embargo se hace imposible por el estado técnico de la excitatriz; las pérdidas reales son menores que las nominales, debido a que no se consideran las que se originan en la excitatriz, por estar fuera del motor.

### Selección de motores asíncronos

A partir de los resultados individuales obtenidos de los motores sincrónicos se selecciona la potencia de los motores asíncronos por el método de la potencia equivalente incorporado en el algoritmo del método y se estiman mediante el mismo algoritmo los parámetros operacionales de dicho motor [7].

La tabla 2, muestra los datos operacionales y nominales del motor asíncrono seleccionado obtenidos después de someter el mismo a la carga del motor en servicio de acuerdo con el gráfico de la potencia en el eje, determinado previamente.

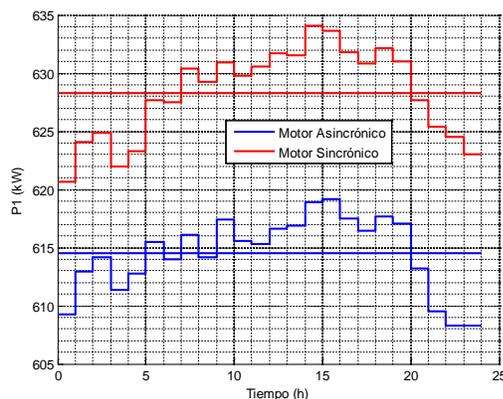
**Tabla 2.** Datos operacionales del motor asíncrono seleccionado

Parámetros	Simbología	UM	Reales	Nominales
Tensión valor promedio	V1	V	6303,76	6300,00
Corriente valor promedio	Is	A	69,74	74,60
Potencia aparente	VA	kVA	761,43	809,24
Potencia reactiva	Qs	kVAr	449,63	474,56
Potencia activa entrada	P1	kW	614,50	655,48
Potencia promedio en el eje	P2	kW	591,17	626,64
Pérdidas medias totales	Zp	kW	23,33	28,84
Eficiencia media	Ef	pu	0,96	0,96
Factor de potencia medio	Fp	pu	0,81	0,81
Velocidad media del rotor	Nr	rpm	887	888
Momento medio en el eje	M2	Nm	6363,15	6738,71
Momento máximo	Mm	Nm	6412,99	13477,41
Coefficiente de Carga	kc	pu	0,94	

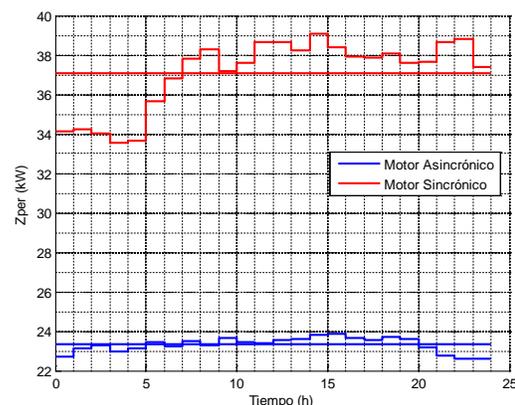
Se observa un comportamiento similar al del motor en funcionamiento, con la diferencia que disminuyen las pérdidas totales y la potencia reactiva en este caso se demanda de la red. La velocidad sufre una ligera variación, pero se considera insignificante para las exigencias técnicas planteadas. La sustitución del motor sincrónico por uno asíncrono, trae cambios en el comportamiento del accionamiento y el sistema energético, por lo cual es necesario realizar una evaluación técnica y económica de este cambio.

### Resultados de la evaluación energética del procedimiento

La figura 1, muestra el comportamiento de la potencia de entrada del motor sincrónico que está en funcionamiento y el motor asíncrono propuesto. En valores reales, obtenidos de las mediciones, para el motor sincrónico en servicio con promedio de 628,26 kW y en valores estimados para el motor asíncrono propuesto con promedio de 614,50 kW. Las ligeras variaciones con respecto al valor medio están dadas por el carácter poco variable de la carga. Por otra parte la figura 2, muestra que el motor sincrónico que está actualmente en funcionamiento presenta más pérdidas que el asíncrono propuesto siendo el valor promedio de las pérdidas de 37,09 kW en el primer motor mientras que en el segundo las pérdidas promedio son de 23,33 kW.

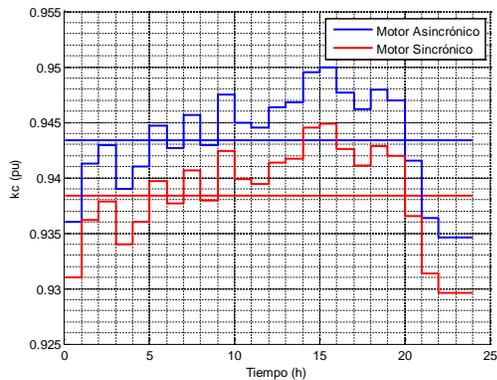


**Fig. 1.** Potencia de entrada para el motor sincrónico y asíncrono.

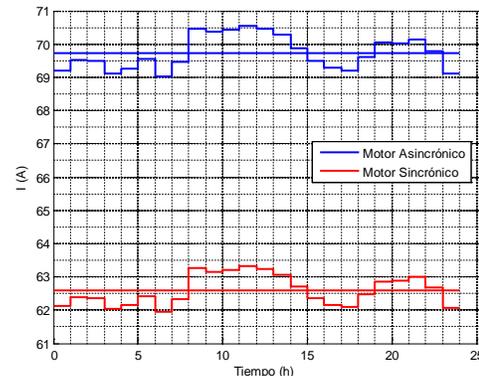


**Fig. 2.** Pérdidas totales para el motor sincrónico y asíncrono.

El factor de carga de la figura 3, también muestra una diferencia de 0,007 entre ambos motores aproximadamente, debido a la reducción de la potencia nominal del motor seleccionado. Ambos motores presentan un buen factor de carga ya que ambos se encuentran por encima del 90 %. La figura 4, muestra una de las pequeñas desventajas que posee el motor propuesto, ya que demanda una corriente de estator ligeramente mayor que el motor en servicio con una diferencia de 7,14 A. Se puede observar que la corriente del motor sincrónico tiene carácter capacitivo mientras que en el asíncrónico es de carácter inductivo, esto influye en cuanto a la potencia reactiva que se suministra o se demanda de la red. Se debe tener en cuenta que en el motor de inducción no existe un devanado independiente para la excitación, está incorporada en la potencia que demanda por el estator, en forma de potencia reactiva, mientras que en los sincrónicos proviene de una fuente independiente de la red; por ello los motores asíncrónicos siempre tienen mayor corriente por el estator que los sincrónicos para la misma carga en el eje.

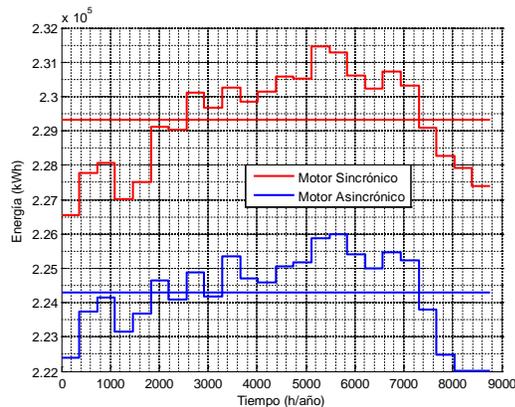


**Fig. 3. Factor de carga para el motor sincrónico y asíncrónico.**

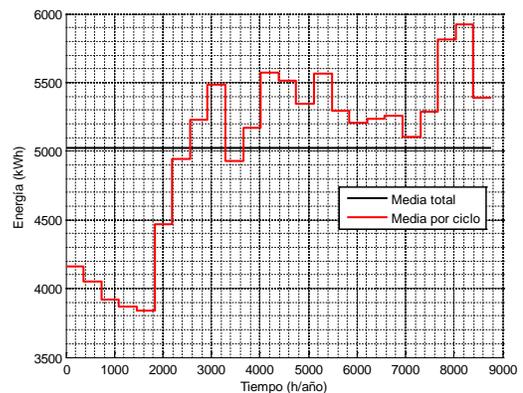


**Fig. 4. Corriente para el motor sincrónico y asíncrónico.**

La figura 5, muestra el comportamiento anual de la energía consumida en 8 760 hs para el motor en servicio, con valor promedio de 229,31 MWh y total 5 503,58 MWh; y un estimado para el motor seleccionado de 224,29 MWh y total de 5 383 MWh, diferencia media de 5,02 MWh y ahorro total de 120,57 MWh; visto en la figura 6, como ahorro por sustitución.



**Fig. 5. Energía anual para el motor sincrónico y asíncrónico.**



**Fig. 6. Ahorro de Energía anual.**

Los elementos, hasta aquí plasmados, unido a las diferencias mostradas en cuanto a los comportamientos del motor sincrónico y asíncrónico demuestran que técnicamente, es posible la sustitución del motor en servicio y la factibilidad del motor seleccionado contra el que está en servicio; resta una evaluación económica que justifique la sustitución.

### Justificación económica de la sustitución

Además de los criterios técnicos que se obtienen resulta necesaria la evaluación económica que justifique la sustitución de motores sincrónicos por asíncrónicos para cuantificar el costo de la inversión y los beneficios que trae consigo y hacer realidad el potencial de ahorro requerido.

El potencial de ahorro se obtiene por diferencia entre la energía consumida por el motor sincrónico en funcionamiento y el consumo de energía pronosticada para el motor de inducción seleccionado, bajo los siguientes datos para el cálculo económico:

- Vida útil del motor 12 años
- Tasa de Descuento 0,12 pu
- Costo de la Energía 0,08 USD/kWh
- Horas de Trabajo Diario 24 h
- Días de Trabajo Anuales 360 días

La tabla 3, muestra el ahorro de energía anual por concepto de sustitución para los accionamientos 1, 3 y 5 de forma individual, donde se puede apreciar el ahorro de energía por diferencia de consumo entre estos motores sometiendo a ambos al mismo gráfico de carga obtenido por el MME. Los resultados obtenidos muestran que económicamente es factible la sustitución.

**Tabla 3. Resumen de energía anual en MWh y evaluación económica**

Motor	Consumo de energía anual		Ahorro de energía anual (MWh)	Evaluación económica	
	Motor en Servicio (MWh)	Motor Propuesto (MWh)		CCV (USD)	PRI (años)
Motor I	229,32	224,29	5,02	121 511,64	5,34
Motor II	222,20	220,00	2,19	101 188,49	6,25
Motor III	237,95	234,34	3,60	111 313,68	7,45

*Nota: CCV, costo del ciclo de vida diferencial; PRI, periodo de recuperación de la inversión.*

### **Influencia de los motores seleccionados en el reactivo de la empresa**

La potencia activa demandada en la empresa es de 40,67 MW y de 19,16 MVar la potencia reactiva total con un factor de potencia de 0,9. La potencia reactiva que suministran a la red los motores sincrónicos en evaluación es de -500,32 kVar y la que demandan los asincrónicos seleccionados es de 1 358. 002 kVar.

Considerando la sustitución la potencia reactiva de la empresa es de 20,02 MVar con un factor de potencia de 0,98; según ecuaciones (3) y (4). La potencia reactiva demandada en la empresa se incrementa en un 4,5 % con la sustitución, lo cual evidencia que para este caso el incremento de potencia reactiva que introducen los motores seleccionados al sistema no compromete el factor de potencia de la empresa.

### **CONCLUSIONES**

La información técnica y económica que brinda el procedimiento desarrollado permite la evaluación energética de motores sincrónicos y asincrónicos en explotación ya sea a velocidad constante o ligeramente variable y la utilización del mismo como herramienta para desarrollar programas de sustitución de accionamientos sincrónicos por asincrónicos.

El comportamiento energético del motor sincrónico y del asincrónico muestra una diferencia de corriente demandada entre ambos de 7,14 A lo que demuestra la compatibilidad de la utilización de motores de inducción en lugar de los sincrónicos.

Con el funcionamiento de los motores asincrónicos triásicos en el lugar que ocupan actualmente los motores sincrónicos evaluados, se obtiene un ahorro de 5 MWh de energía anual y se evita el costo de 4 632,21 USD por reparación del motor sincrónico en servicio, lo que demuestra la factibilidad y rentabilidad técnico económico de la sustitución.

### **REFERENCIAS**

- [1] Siraki, A. G. y Pillay, P., "An In Situ Efficiency Estimation Technique for Induction Machines Working With Unbalanced Supplies.". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2012, vol. 27, n. 1, p. 85-95. ISSN 0885-8969.

- [2] Viego Felipe, P. R.; Gómez Sarduy, J. R.; *et al.*, "Determinación IN-SITU del factor de potencia y la eficiencia de motores asincrónicos a cargas parciales". *Ingeniería Energética*, 2014, vol. 35, n. 1, p. 15-26. ISSN 1815-5901.
- [3] IEEE. *IEEE Standart 115: Test Prosedures for Synchronous Machines*. New York. 1983, p. 90. ISBN 978-0-7381-6135-8.
- [4] IEC 60034-2-1, *Rotatory Electrical Machines part 2-1, Standard Methodes for Determiny Losses and Efficient from Tests*. Switzerland: Suiza. ISBN 2-8318-9250-3, 2007.
- [5] Martínez, E. y Torrent, M., "Determinación del rendimiento en motores de inducción trifásicos según la Norma IEC 60034-2-1". *Técnica Industrial*. Julio-Agosto 2009, n. 282, p. 36-41. ISSN 0040-1838.
- [6] Feng, Y.; Yu, X. y Han, F., "High-Order Terminal Sliding-Mode Observer for Parameter Estimation of a Permanent-Magnet Synchronous Motor". *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*. 2013, vol. 60, n. 10, p. 4272-4280. ISSN 0278-0046.
- [7] Oviedo, S. J.; Quiroga, J. E. y Ordóñez Plata, G., "Experimental Validation of Motor Current Signature Analysis for a 2HP Induction Motor". *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 2014, n. 70, p. 108-118. ISSN 0120-6230.
- [8] Jaramillo-Matta, A. A.; Franco-Mejia, E. y Guasch-Pesquer, L., "Invariants parameter estimation for an induction motor". *Dyna*, 2011, vol. 78, n. 169, p. 88-94. ISSN 0012-7353.
- [9] Romero, I.; De Armas, M.; *et al.* "Evaluación energética de motores asincrónicos ante armónicos y desbalance de voltaje en una empresa minera". *Minería y Geología*, Enero-Marzo 2012, vol. 28, n. 1, p. 47-59. ISSN 1993 8012.
- [10] Lu, B.; Habetler, T. G. y Harley, R. G., "A Survey of Efficiency Estimation Methods of In-Service Induction Motors with Considerations of Condition Monitoring Requirements". In: *Proceedings of the Electric Machines and Drives*. 2005. *IEEE International Conference on 2005 IEEE*. pp. 1365-1372. ISSN 0780389875.
- [11] Figura, R.; Szychta, E. y Szychta, L., "In-Service Efficiency Estimation with the use Modified Air-Gap Torque Method for Squirrel-Cage Induction Motor". *Electronics and Electrical Engineering*. 2011, vol. 8, n. 114, p. 51-56. ISSN 1392-1215.
- [12] Herndler, B.; Barendse, P. y Khan, M. A., "Considerations for Improving the Non-Intrusive Efficiency Estimation of Induction Machines using the Air Gap Torque Method". In: *Proceedings of the IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*. Niagara Falls, ON, 15-18 May 2011. p. 1516-1521. ISSN 978-1-4577-0060-6. DOI 10.1109/IEMDC.2011.5994834.
- [13] Peña, A. C. y Sánchez, J. M. G., "Gestión de la eficiencia energética: cálculo del consumo, indicadores y mejora". AENOR, 2012. ISBN 8481437522. Disponible en web: [http://www.eu.aenor.es/aenor/descargadocumento.asp?nomfich=/Documentos/Comercial/Archivos/PUB\\_DOC\\_Tabla\\_AEN\\_9676\\_1.pdf&cd\\_publicacion=9676&cd\\_publicacion\\_doc=1](http://www.eu.aenor.es/aenor/descargadocumento.asp?nomfich=/Documentos/Comercial/Archivos/PUB_DOC_Tabla_AEN_9676_1.pdf&cd_publicacion=9676&cd_publicacion_doc=1). 10/02/2015.

## AUTORES

### Nilka Hernández Dieguez

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

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

### Ignacio Romero Rueda

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

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

### Orlando Graña Alarcón

Ingeniero Eléctrico, Especialista A en mantenimiento industrial, Empresa Ernesto Che Guevara (ECG). Moa, Holguín, Cuba.

E-mail: [OGrana@ecg.moa.minem.cu](mailto:OGrana@ecg.moa.minem.cu)

### Yetsy Silva Cala

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

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

**Anexo A**

Esquema por bloques del algoritmo de evaluación de motores sincrónicos.

