

Evaluación energética de motores asincrónicos ante armónicos y desbalance de voltaje en una empresa minera

Ignacio Romero Rueda
Marcos de Armas Teyra
Bárbara M. Pérez Mena
Yordan Guerrero Rojas

Resumen

El propósito del artículo es exponer una variante para evaluar, en las empresas mineras de Moa, las prestaciones energéticas de motores asincrónicos partiendo de que la eficiencia de estos es afectada por niveles considerables de armónicos de varios órdenes provenientes de las fuentes de suministro eléctrico. El procedimiento se fundamenta en el método del momento en el entrehierro *off line*, en presencia de armónicos y desbalance de voltaje; permite determinar la potencia en el eje, el gráfico de la eficiencia y otros parámetros funcionales de motores eléctricos asincrónicos en condiciones de campo. La implementación del procedimiento ha reportado resultados satisfactorios al facilitar el desarrollo de programas de ahorro de energía con motores asincrónicos en las empresas mineras.

Palabras clave

Método del momento en el entrehierro; motor de inducción; evaluación de eficiencia en el campo; eficiencia energética; contaminación por armónicos; desbalance de tensión.

Energetic evaluation of asynchronous motors in presence of harmonics and unbalanced voltage in mining enterprises

Abstract

The purpose of the article is to expose a procedure to evaluate, in the Moa's mining enterprises, the energetic advantages of the asynchronous motors, considering that high level of several order harmonics incoming from the sources of electric supply affect their efficiency. The procedure is sustained by the method of air gap torque off line in harmonics and unbalance presence; it allows determining the power on the shaft, the efficiency graphic and other functional parameters of asynchronous electric motors in field conditions. The implementation of the procedure has reported satisfactory results by support the developing energy saving programs of the asynchronous motors in the mining enterprises.

Key words

Aair gap torque method; induction motor; field efficiency evaluation; energetic efficiency; contamination by harmonics; unbalanced voltage.

1. INTRODUCCIÓN

En las minas modernas para transportar el mineral a la superficie se emplean potentes ascensores eléctricos. La ventilación se realiza con ventiladores centrífugos y axiales; se utilizan compresores altamente productivos para suministrarle a las minas la energía neumática. En el desagüe operan bombas centrífugas y en los laboreos a cielo abierto se usan las excavadoras, máquinas perforadoras, locomotoras eléctricas, etc.; tales máquinas son accionadas por motores eléctricos, generalmente del tipo asincrónico (Maliuk 1985).

En las empresas que utilizan gran cantidad de motores eléctricos, una parte de ellos, generalmente, se encuentra en reparaciones o mantenimientos y muchos operan periódicamente (accionamientos eléctricos de excavadoras, grúas eléctricas). Estos factores hay que tenerlos en cuenta al realizar los cálculos de la carga eléctrica de la subestación.

El desarrollo de la industria minero-metalúrgica demanda el aumento de las potencias de las instalaciones eléctricas y un alto consumo de energía eléctrica; por ello, la utilización racional de las instalaciones y la racionalización máxima de la energía eléctrica tiene gran importancia desde el punto de vista económico, ya que el consumo de energía eléctrica incide en gran medida en el costo de producción de las empresas, y en particular, de las empresas mineras.

La fuente de potencia en muchas ocasiones está contaminada por armónicos de orden superior y por desbalance de tensión. La norma IEEE-519 (1992) ofrece las recomendaciones prácticas y los requerimientos para el control de los armónicos en el sistema eléctrico de potencia.

La *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) especifica los límites de variación para la tensión y frecuencia nominales (NEMA 2004); esto es $\pm 10\%$ de la tensión nominal a frecuencia nominal, o $\pm 5\%$ de la frecuencia nominal con tensión nominal (Andreas 1992).

El desbalance de tensión en los terminales del motor está limitado al uno por ciento. La norma IEEE-112-B (2004), para el ensayo de mo-

tores de inducción, especifica un límite gráfico para el desbalance, la desviación de tensión y el contenido de armónicos.

Las pérdidas ocasionadas por la presencia de armónicos en la fuente de suministro eléctrico constituyen una pérdida adicional en el motor de inducción. El objetivo del presente trabajo es proponer una variante del método del momento en el entrehierro (MME) para evaluar, en empresas mineras de Moa, la eficiencia de motores asincrónicos.

La variante propuesta considera la contaminación de las redes eléctricas por armónicos y desbalance de tensión, así como el estado de carga real en el lugar que ocupa el motor. La novedad consiste en considerar las componentes pares de las ondas de tensiones y corrientes en la ecuación de cálculo del momento en el entrehierro debido a la asimetría de las mismas con respecto al eje de las abscisas, aspecto no tratado en otros trabajos donde sólo se consideran las componentes impares, como es propio de las ondas simétricas.

2. MÉTODOS

2.1. Métodos para evaluar la eficiencia del motor de inducción en el campo

Dentro de los métodos tradicionales para evaluar y seleccionar motores, el más apropiado es aquel que permite conocer la potencia en el eje. Para ello se necesitan instrumentos especializados que midan el momento en el eje y la velocidad de giro (Ferreira & de Almeida 2008).

Existen varios métodos para determinar la eficiencia (Gharakhani Siraki & Pillay 2011; Herndler *et al.* 2011; Sakthivel & Subramanian 2010; Zhang *et al.* 2011). De estos, como mejores candidatos para condiciones de campo, se proponen los métodos ORMEL96, ORNL y el MME (Bin *et al.* 2006b). Los errores reportados para estos métodos son de 4 % para el primero, de 2 a 3 % para el segundo y de 0,5 % para el tercero. Los tres arrojan resultados precisos cuando el estado de carga del motor supera el 50 %.

La variante del MME que se propone estima la eficiencia con base en las formas de ondas de tensiones y corrientes en los terminales, sin

requerir mediciones de velocidad y momento en el eje. Esta variante fue aplicada a un motor que acciona la bomba centrífuga de desagüe de una mina a cielo abierto en Moa. La recolección de los datos puede hacerse desde el centro de control de motores, sin costo alguno (de Armas *et al.* 2011). Otro beneficio de este esquema de medición es que los centros de control de motores son mucho más accesibles en comparación con el lugar en que se encuentra situado el motor, lo que reduce los riesgos y la complejidad de la toma de datos, con la consiguiente disminución de los costos.

2.2. Ecuación del momento en el entrehierro

Seleccionando un sistema de referencia estacionario, el flujo mutuo del estator está dado por la integral de la tensión de entrada menos la caída de tensión en la resistencia del estator. La potencia instantánea p_{inst} , a través de las magnitudes en el sistema de referencia dq , se expresa en ; el momento en el entrehierro, en (2); en (3) aparece su expresión desarrollada para las magnitudes del sistema trifásico (Bin *et al.* 2006a; Figura *et al.* 2011; Herndler *et al.* 2011).

$$p_{inst} = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q + 2u_0 i_0) \tag{1}$$

$$T_{ag} = \frac{3}{2} \frac{p}{2} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \tag{2}$$

$$T_{ag} = \frac{p}{2\sqrt{3}} \left\{ \begin{aligned} & (2i_a + i_b) \int [v_{ab} - R_s (i_a - i_b)] dt \\ & + (i_a - i_b) \int [v_{ca} + R_s (2i_a + i_b)] dt \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

Donde: p es el número de polos del motor; U_d , U_q y U_0 e i_d , i_q e i_0 tensión y corriente por el eje directo, transversal y de secuencia cero, respectivamente; λ_d flujo magnético por el eje directo y λ_q flujo magnético por el eje transversal; v_{ab} , v_{ca} tensiones de líneas ab y ca , respectivamente; i_a , i_b son las corrientes de las fases a y b .

Una de las ventajas asociadas al MME es que, implícitamente, considera las pérdidas debidas a las desviaciones de tensión y de frecuen-

cia y el desbalance que pueda existir en la fuente de suministro, así como las pérdidas de cobre en el enrollado y las pérdidas adicionales del estator (Bin *et al.* 2006a; Hsu and Scoggins 1995).

2.3. Estimado de la eficiencia de motor

La potencia en el eje del motor es el producto del momento en el eje (T_{eje}) y la velocidad del rotor (ω_r). El momento en el eje es la diferencia entre el momento en el entrehierro (T_{ag}) y el momento de pérdidas correspondiente a las pérdidas mecánicas (p_{fw}) y las pérdidas adicionales (p_{adr}) producidas por la corriente del rotor. La potencia en el eje se expresa según :

$$T_{eje} = T_{ag} - \frac{P_{fw}}{\omega_r} - \frac{P_{adr}}{\omega_r} \quad 4$$

Las pérdidas adicionales del rotor se deben en gran parte a la corriente del rotor y se asumen de acuerdo con la Standart IEEE 112 (2004). Finalmente, la eficiencia η , es definida por la potencia en el eje (P_{eje}) y la de entrada ($P_{entrada}$), según .

$$\eta = \frac{P_{eje}}{P_{entrada}} = \frac{T_{eje} \cdot \omega_r}{P_{entrada}} = \frac{T_{ag} \cdot \omega_r - p_{fw} - P_{adr}}{P_{entrada}} \quad 5$$

De las ecuaciones (3), (4) y (5) se deduce que para determinar la eficiencia, aplicando el MME, es necesario conocer las corrientes y tensiones de línea, la velocidad de rotación del rotor, la resistencia de fase del estator, las pérdidas de fricción, batimiento y núcleo y las pérdidas adicionales del rotor.

Si se desconocen las pérdidas de fricción, batimiento y núcleo puede asumirse que oscilan alrededor del 3,5 % de la potencia de salida nominal (Bin *et al.* 2006a). Las pérdidas adicionales del rotor se asumen en función de la potencia de salida (P_n), de acuerdo con la norma IEEE 112 (2004).

$$CCV = - \left[I.I. + \sum_{i=1}^n \frac{G_i}{(1+D)^i} \right] \quad 6$$

$$PRI_{simple} = \frac{Costo_{M.nuevo}}{Costo_{Anual}} \quad 7$$

En la ecuación (6) I.I. es la inversión inicial en USD; G_i son los gastos de energía en USD, n los años considerados y D es la tasa de descuento. En este trabajo la vida útil de un motor se consideró de 12 años y la tasa de descuento del 12 %. El costo de la energía es una opción que puede modificarse; en este caso se utiliza un valor de 0,08 USD/kWh. El ahorro se determina por la diferencia de los CCV de las alternativas consideradas.

2.5. Algoritmo de cálculo

Los datos utilizados para la modelación pueden obtenerse de los registros de los analizadores de redes instalados a la entrada de cada uno de los motores evaluados. En la Figura 1 se muestra el diagrama de bloques del programa desarrollado para la evaluación de motores de inducción en presencia de armónicos y asimetría en las empresas mineras. La velocidad se calcula por el método de los armónicos de ranuras (Stocks 2006).

Para calcular el consumo de energía, las pérdidas y sus costos se somete la máquina seleccionada por el programa al mismo diagrama de carga desarrollado por el motor en servicio.

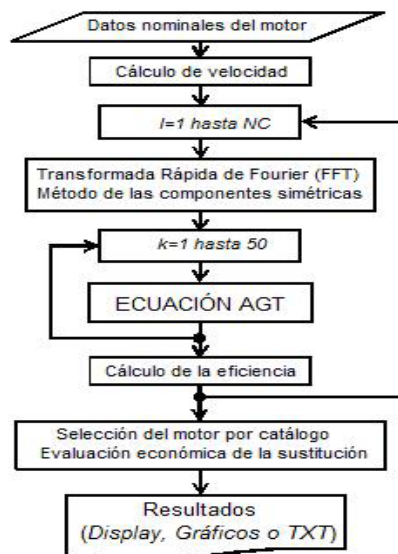


Figura 1. Diagrama de bloques para la evaluación de motores asíncronos en presencia de armónicos y desbalance en la tensión de alimentación.

3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Como referencia para la validación experimental de la variante propuesta se tomó el resultado obtenido por Bin et al. (2006a), quienes comparan la efectividad del MME con otros métodos que determinan la eficiencia, como ORNL y ORMEL96.

La variante del MME empleada en este trabajo considera todos los armónicos superiores en una onda asimétrica con respecto al eje de las abscisas y se compara con el algoritmo desarrollado por de Armas et al. (2011) quienes examinan una onda simétrica sinusoidal y no utilizan la descomposición en secuencias positiva y negativa.

4. RESULTADOS

Los resultados de la evaluación por el MME, sin considerar los armónicos y por la variante que incluye a éstos, se muestran en la Tabla 1 para el motor en estudio; las diferencias entre las eficiencias, el factor de potencia y la potencia en el eje pueden ser observadas. Para el motor evaluado el desbalance de tensión es de 0,99 %, según NEMA (2004) y la distorsión armónica total de tensión es de 1,39 %, según IEEE 519 (1992).

Tabla 1. Comparación de resultados obtenidos con ambos métodos

Parámetros	Nominales	MME sin armónicos	MME con armónicos
Tensión (V)	220	235,69	235,71
Corriente (A)	73,74	61,61	61,63
Potencia de entrada (kW)	24,73	21,48	21,18
Potencia en el eje (kW)	22,50	19,01	18,72
Pérdidas (kW)	2,23	2,42	2,46
Eficiencia (%)	91	89	88
Cos ϕ (%)	88	86	84
Momento (Nm)	60,53	51,10	50,27

En la Figura 2 se representa el comportamiento del momento, para secuencia positiva. Valor medio de 52,85 Nm, valor mínimo de 52,31 Nm

y máximo de 53,64 Nm, desviación estándar baja, de 0,353 Nm debido al trabajo con una carga prácticamente constante.

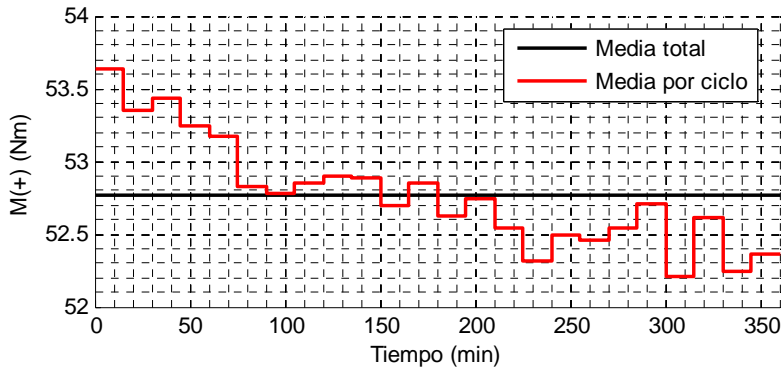


Figura 2. Momento de secuencia positiva.

La Figura 3 representa el comportamiento del momento para secuencia negativa. Valor máximo 13,29 mNm, mínimo 9,39 mNm y medio de 11,08 mNm, con desviación estándar de 1,194 mNm.

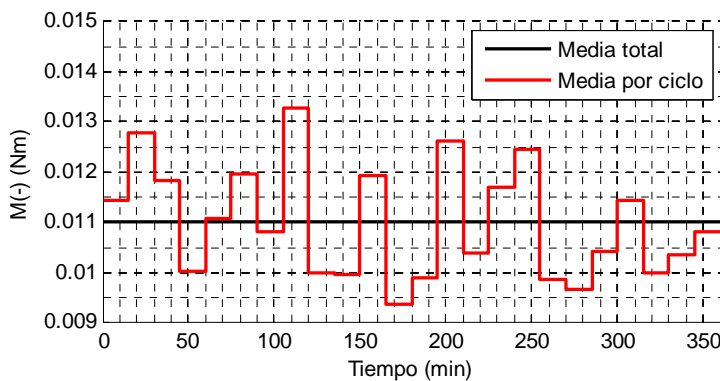


Figura 3. Momento de secuencia negativa.

El comportamiento de la potencia de entrada para el motor en servicio evaluado y para valores estimados del motor propuesto (motor sustituto) se observa en la Figura 4. El valor promedio de la potencia de entrada para el primero es de 21,19 kW y de 20,33 kW para el segundo. Las ligeras variaciones de este valor están dadas por el carácter poco variable de la carga, mientras la diferencia en la potencia en el eje de ambos motores se debe a la desigualdad de sus potencias nominales (22,5 kW en el motor evaluado y 18,65 kW en el motor sustituto).

Los valores bajos para secuencia negativa (Figura 4) y altos para secuencia positiva (Figura 3) se deben al poco contenido de armónicos y a la existencia de una asimetría menor de 5 % en la onda de tensión, de acuerdo con la norma IEEE 112 – 2004 (IEEE 112 2004).

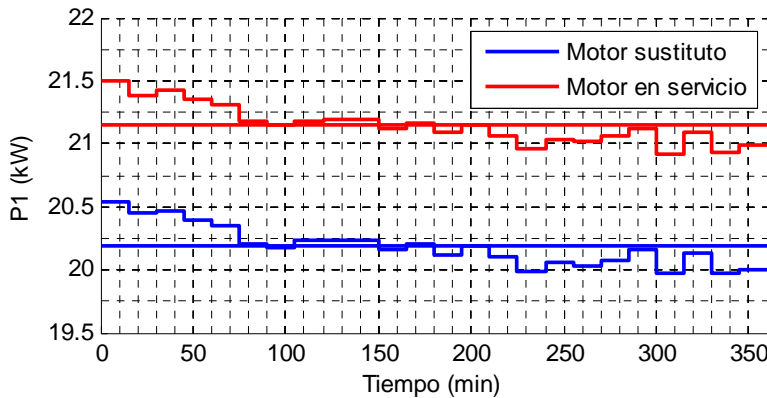


Figura 4. Potencia de entrada real y estimada de ambos motores.

La Figura 5 muestra que el motor sustituto resulta más eficiente, lo que posibilita el ahorro de energía por reducción de pérdidas. El valor promedio de eficiencia para el motor evaluado es de 88 % mientras el del motor sustituto alcanza el 91 %.

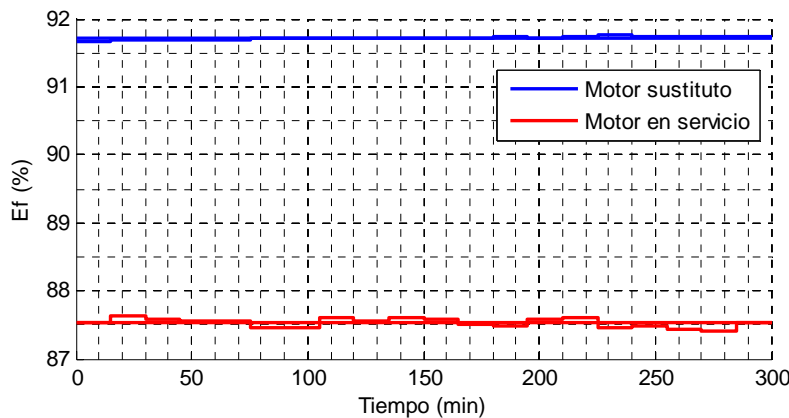


Figura 5. Eficiencia real y estimada de ambos motores.

Para el análisis del motor en servicio se tomaron 12 horas diarias de trabajo durante 300 días del año, reportando un costo de ciclo de vida (CCV) diferencial de 2145.81 USD, con un período de recuperación de la inversión (PRI) de 4,98 años.

En la Tabla 2 puede verse que con el motor sustituto es posible reducir las pérdidas por disminución de la corriente demandada y que su eficiencia es mayor que la del motor actual.

Tabla 2. Comparación entre las prestaciones de ambos motores

Parámetros	Motor sustituto		Motor en estudio	
	Nominales	Estimados	Nominales	Reales
Tensión (V)	220,00	235,71	220	235,71
Corriente (A)	60,00	56,60	73,74	61,63
Potencia de entrada	20,34	20,33	24,73	21,18
Potencia en el eje	18,65	18,65	22,50	18,72
Pérdidas (kW)	1,69	1,69	2,23	2,46
Eficiencia (%)	92	92	91	88
Cos φ (%)	88	88	88	84
Momento (Nm)	50,52	50,62	60,53	50,27

El empleo del la variante del MME propuesta permite desarrollar dos tipos de programas de ahorro de energía: uno de remodelación y mejoramiento energético con la selección de un nuevo motor (de lo cual trata este trabajo) y otro que permitiría evaluar la eficiencia de las cargas accionadas en las empresas mineras si se mide la potencia de salida de la bomba, como sugieren de Armas et al. 2011.

La aplicación del MME no es de uso común para evaluar energéticamente los motores asincrónicos en el campo, lo que sí permite la variante desarrollada en este trabajo, que resulta relevante ante el incremento actual de las cargas no lineales, el aumento del costo de la energía, las dificultades financieras y el deterioro creciente del medioambiente.

5. CONCLUSIONES

- El método presentado evalúa las prestaciones energéticas de los motores asincrónicos en explotación que operen a velocidad constante o ligeramente variable en las empresas mineras y permite iniciar proyectos de sustitución de motores y perfeccionamiento energético.

- La variante del método del momento en el entrehierro en presencia de armónicos y desbalance de tensión contempla las pérdidas en el motor por estos conceptos, lo que permite perfeccionar otros métodos al considerar la asimetría de las ondas con respecto al eje de la abscisas.

6. REFERENCIAS

- ANDREAS, J. C. 1992:** *Energy-efficient electric motors: selection and application*. Marcel Dekker, New York, 52 p.
- BIN, L.; THOMAS, G. H. & RONALD, G. H. 2006a:** A nonintrusive and in service motor efficiency estimation method using air gap with considerations of condition monitoring. In: Proc. IEEE Ind. Appl. Annu. Meeting.
- BIN, L.; THOMAS, G. H. & RONALD, G. H. 2006b:** A survey of efficiency-estimation methods of in-service induction motors. *IEEE Trans. Ind. Appl.* Jul/aug 42(4):924-933.
- DE ARMAS, M.; GÓMEZ, J. & VIEGO, P. 2011:** Evaluación de motores en servicio. En: Convención de Ingeniería Eléctrica *CIE2011*. Santa Clara, Cuba.
- FERREIRA, F. & DE ALMEIDA, A. 2008:** Considerations on in field induction motor load estimation methods. In *18th Inter. Conf. on Electrical Machines (ICEM'08)*, Conf. Proc. Vilamoura, Portugal.
- FIGURA, R.; SZYCHTA, E. & SZYCHTA, L. 2011:** In-service efficiency estimation with the use modified air-gap torque method for squirrel-cage induction motor. *Electronics and Electrical Engineering* 8(114):51-56.
- GHARAKHANI SIRAKI, A. & PILLAY, P. 2011:** A novel evolutionary based in-situ efficiency estimation technique for induction machines working with unbalanced supplies. In: Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International Niagara Falls, ON, p. 1563 -1568.
- HERNDLER, B.; BARENDSE, P. & KHAN, M.A. 2011:** Considerations for improving the non-intrusive efficiency estimation of induction machines using the air gap torque method. In. Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International. Niagara Falls, ON, 1516 -1521.
- Hsu, J. S. & SCOGGINS, B. P. 1995:** Field test of motor efficiency and load changes through air-gap torque. *IEEE Trans. Energy Conversion*, sept., 10:471-477.

- IEEE STANDARD 112. 2004:** Test procedure for polyphase induction motors and generators. New York.
- IEEE STANDARD 519. 1992:** Recomendaciones prácticas y requerimientos de la IEEE para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia, New York.
- MALIUK, S. P. 1985:** *Electrificación de minas*. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 160 p.
- NEMA 2004:** Standards Publication MG 1-2003, Revision 1-2004, Motors and Generators, Washington D.C.
- SAKTHIVEL, V. & SUBRAMANIAN, S. 2010:** Swarm intelligence algorithm for induction motor field efficiency evaluation. In: B. PANIGRAHI; S. DAS; P. SUGANTHAN & S. DASH: *Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing*. Springer Berlin/Heidelberg, vol. 6466, 545-558.
- STOCKS, M. 2006:** Modeling, analysis, state and parameter estimation of faulty induction machines. Lulea, Sweden.
- ZHANG, H.; ZANCHETTA, P.; GERADA, C.; BRADLEY, K. & LIU, J. 2011:** Performance evaluation of induction motor efficiency and in-service losses measurement using standard test methods. In: Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International Niagara Falls, ON, 913-917.

Ignacio Romero-Rueda

iromero@ismm.edu.cu

Ingeniero eléctrico. Máster en Ciencias. Profesor auxiliar.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba.

Marcos de Armas-Teyra

marmas@ucf.edu.cu

Ingeniero eléctrico. Profesor Titular. Doctor en Ciencias,
Centro de Estudio de Energía y Medio Ambiente
(CEEMA). Universidad de Cienfuegos, Cuba.

Bárbara M. Pérez-Mena

bperez@ismm.edu.cu

Ingeniera eléctrica. Profesora instructora.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Cuba.

Yordan Guerrero-Rojas

yretirado@ismm.edu.cu

Ingeniero eléctrico. Profesor asistente.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Cuba.