



# Valoración de métodos para la determinación de la eficiencia de motores de inducción que accionan cargas en régimen de trabajo continuo variables en el tiempo

Daynell Santana  
Rolando Madiedo

Recibido: Octubre del 2007  
Aprobado: Diciembre del 2007

## Resumen / Abstract

En el trabajo se valoran varias metodologías para determinar la eficiencia de los motores de inducción que operan en régimen continuo, con carga variable en el tiempo. Los métodos que se analizan, se desarrollaron a partir de métodos ya existentes y reconocidos por las normas cubanas e internacionales para calcular la eficiencia de los motores de inducción con carga constante. La parte experimental de este trabajo se realizó en la empresa CEPIL, de Ciego de Ávila, por tener esta en su cadena productiva un número elevado de motores que trabajan con cargas de este tipo. Un aspecto que es importante valorar y de hecho se realiza en el presente trabajo, es la factibilidad de aplicar cada uno de los métodos para determinar la eficiencia en motores de inducción que se encuentran instalados en alguna industria que se encuentra produciendo y que por regla general es difícil interrumpir el proceso productivo.

Palabras clave: Motores de inducción, eficiencia de motores

There are some methodology ways in order to determine the induction machine efficiency with time variable load in the uninterruptible regimen. The methods are developed from already existing other ones, which have been recognized by national and international standards. The experimental part of this project was performed at CEPIL enterprise in Ciego de Avila district, because there are a lot of this type working machines. The most important thing we have evaluated at present is the reliability and the possibility of applying this methods avoiding brake the production process.

Key words: Induction motors, efficiency of motors

## INTRODUCCIÓN

El mundo se encuentra en una crisis energética debido al agotamiento de las reservas de petróleo y demás combustibles fósiles, esto unido al efecto invernadero provocado por el uso excesivo de dichos combustibles, constituye el mayor problema que existe hoy en el planeta. Por lo que el tema del ahorro energético se ha convertido en una prioridad.

Estudios realizados han permitido comprobar que aproximadamente el 60 % de la energía eléctrica en el mundo es consumida por los motores de inducción.

Antiguamente el costo de un motor era un factor determinante para su adquisición, con la elevación del precio de la electricidad, el consumo de la energía se convierte en un componente principal del costo. Lo que hace necesario llevar a cabo medidas y métodos que garanticen el incremento real de la eficiencia en los motores que se adquieran y que se vayan a explotar.

La evaluación del aprovechamiento del potencial de ahorro en los accionamientos con motores asincrónicos requiere de la determinación de la eficiencia, que por ser un número difuso ofrece cierta incertidumbre que afecta la toma de decisión.

Para la determinación de la eficiencia de los motores de inducción existen métodos y procedimientos reconocidos por normas nacionales e internacionales, tales como las Normas IEEE-112, Normas IEC-60034, Normas JEC-37,<sup>1-3</sup> etc., y entre los métodos se pueden citar: Método del dinamómetro, Método del diagrama circular, Método de segregación de pérdidas, etcétera.

En general, estos métodos presentan un grupo de desventajas, que prácticamente invalidan su aplicación en la industria cubana. Entre ellas se encuentran: Necesidad de contar con equipamiento específico para la realización de los ensayos, disposición de instrumentos de medición de alta precisión y necesidad de parar el proceso productivo para la realización de los ensayos, entre otras.

Por lo tanto, se hace imprescindible establecer metodologías que permitan obtener la eficiencia de los motores asincrónicos, teniendo en cuenta las posibilidades reales de la industria.

De tal manera, en el trabajo se hace referencia a los principales procedimientos alternativos, basados en métodos reconocidos por las normas, que permitan obtener la eficiencia con un nivel de exactitud aceptable para los estudios de ingeniería y a partir de ahí se desarrolla una metodología para determinar la eficiencia de los motores que operan en régimen continuo

Dentro de las industrias que en su proceso productivo tienen regímenes de trabajo con carga variable en el tiempo, entre ellas las cargas variable cíclica, se encuentran las industrias metalmeccánica y petroleras que representan un alto porcentaje del consumo energético en Cuba. En la provincia de Ciego de Ávila, la empresa CEPIL es una de las industrias altamente consumidoras de energía eléctrica y además, tiene en su cadena productiva un número elevado de dichos motores. A pesar de ello no existe una metodología para determinar la eficiencia de los motores que operan con dichas cargas, lo que impide evaluar el potencial de consumo energético. Por lo que se pretende implementar, basándose en los métodos para determinar la eficiencia de los motores de inducción con carga continua y constante en condiciones de la industria, una metodología para los motores con carga cíclica, además de precisar la incertidumbre de cada método para facilitar la toma de decisiones a la hora de usarlos.

## DESARROLLO

Para determinar la eficiencia en los motores de inducción se usan varios métodos, reconocidos por las normas internacionales.<sup>1-5</sup>

Partiendo de estos métodos se confeccionaron otros para los motores que trabajan en régimen continuo con carga variable cíclica. A continuación, se muestran las expresiones para el cálculo de la eficiencia y de la incertidumbre, para cada método propuesto.

### Métodos para la determinación de la eficiencia

Los motores de inducción son parte importante en la industria cubana, de ellos los que trabajan en régimen continuo con carga variable cíclica, desempeñan un papel determinante en la producción nacional. Pero no existe una metodología para determinar la eficiencia de estos motores lo que impide evaluar el potencial de consumo energético. Es por eso que, basándose en los métodos existentes para calcular la eficiencia de los motores de inducción con carga constante y continua, se proponen métodos desarrollados para los motores en régimen constante variable en el tiempo.

### Método de separación de pérdidas

Para aplicar este método es necesario realizar los siguientes ensayos:

#### **Ensayo de vacío, con carga y medición de resistencia del estator**

El método se basa en la conocida expresión de la relación de energía y potencia.

$$E = \int_0^t P dt$$

Se calculan las diferentes pérdidas que ocurren en la máquina y con ellas las energías de pérdidas, luego se determina:

$$\Sigma E_p \quad E_{cu1} \quad E_{rot1} \quad E_{cu2} \quad E_{ad}$$

Es de resaltar que en base a la relación de las corrientes del motor:

$$I_2^2 = I_1^2 - I_0^2$$

Se puede decir con suficiente aproximación que:

$$E_{cu2} = \int_0^t I_{2(t)}^2 r_2 m dt$$

Donde  $r_2$  se calcula por el circuito equivalente.

La eficiencia se obtiene a partir de las energías de pérdidas.

$$\eta = \frac{E_1 - \sum E_p}{E_1}$$

Como la eficiencia se calcula a través de las pérdidas, la incertidumbre de las pérdidas se tiene en cuenta a la hora de hallar la de la eficiencia.

$$U_\eta = \sqrt{\left(\frac{\sum E}{E_1^2}\right)^2 U_{E_1}^2 + \frac{UE_{cu1}^2}{E_1^2} + \frac{UE_{cu2}^2}{E_1^2} + \frac{UE_{fe}^2}{E_1^2} + \frac{Ep_{ad}^2}{E_1^2}}$$

## Método de la corriente

### Primera variante

Este método se basa esencialmente en medir la corriente de entrada, ya que teniendo en cuenta los datos de chapa, como son la corriente nominal y potencia nominal, se puede calcular la potencia de salida, esto es:

$$P_2 = \frac{I_1}{I_n} P_n$$

De donde:

$$E_2 = \frac{P_n}{I_n} \int_0^T I_1 dt$$

Además, en este método se hace la consideración de que la corriente que consume el motor es toda activa y la corriente magnetizante es toda inductiva, por lo que el método es práctico en caso de que existan cargas altas y no siendo así para cargas bajas. Este método es bastante inexacto y poco intrusivo.

La incertidumbre se calcula como:

$$U_\eta = \sqrt{\left(\frac{1}{E_1}\right)^2 U_{E_2}^2 + \left(-\frac{E_2}{E_1^2}\right)^2 U_{E_1}^2}$$

### Segunda variante

En esta variante se mide la corriente de entrada, se hace el ensayo de vacío para determinar la corriente de vacío ( $I_0$ ) y se tienen en cuenta los datos de chapa, esencialmente la corriente y potencia nominal.

$$P_2 = \left(\frac{I_1 - I_0}{I_n - I_0}\right) P_n$$

La incertidumbre de la potencia de salida es hallada, para ayudar al cálculo de la energía de salida.

La eficiencia se calcula como en la primera variante.

### Tercera variante

En esta variante se hace prácticamente lo mismo que en la variante anterior, solamente cambia el planteamiento de la ecuación debido a que se basa en linealizar la curva de la corriente de vacío.

Entonces vuelve a calcular la incertidumbre de la potencia de salida con la expresión ajustada y posteriormente la energía de salida.

La eficiencia y su incertidumbre se calculan igual que las variantes anteriores.

## Método del factor de carga

De un motor asincrónico se conoce

$$P_2 = P_1 - \sum p \quad \text{su equivalente} \quad E_2 = E_1 - \sum E_p$$

Sustituyendo en la expresión de la eficiencia se obtiene:

$$\eta = \frac{E_1 - \sum E_p}{E_1}$$

Además, se puede definir el factor de carga ( $K_c$ ) como la relación entre la potencia de entrada y la potencia de entrada nominal, lo que sería lo mismo, la energía de entrada y la energía de entrada nominal.

$$K_c = \frac{E_1}{E_{1n}}$$

Lo que es lo mismo:

$$E_2 = E_1 - \sum E_p$$

Sustituyendo:

$$\eta = \frac{K_c - E_{0pu} - Ep_{cupu}}{K_c}$$

Como se conoce las pérdidas de cobre dependen del cuadrado de la corriente, la cual es proporcional a la potencia consumida por la máquina, entonces, se puede asumir que las pérdidas de cobre dependen del cuadrado del factor de carga, afectado por un coeficiente de reducción de pérdidas.

$$Ep_{cupu} = A \cdot K_c^2$$

El cálculo del coeficiente de reducción de pérdidas (A) se realiza a partir de los datos nominales de la máquina.

La incertidumbre de la eficiencia:

$$U_{\eta} = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial K_c}\right)^2 U_{K_c}^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial E_{opu}}\right)^2 U_{E_{opu}}^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial E_{p_{cupu}}}\right)^2 U_{E_{p_{cupu}}}^2}$$

Resolviendo los factores de sensibilidad:

$$U_{\eta} = \sqrt{\left(\frac{E_{opu} + E_{p_{cupu}}}{K_c}\right)^2 U_{K_c}^2 + \left(\frac{-1}{K_c}\right)^2 (U_{E_{opu}}^2 + U_{E_{p_{cupu}}}^2)}$$

**Método de la potencia**

A partir de la recta  $P_1 = m \cdot P_2 + P_0$  (método de linealización de la potencia) se despeja  $P_2$  y se determina para cualquier valor de  $P_1$  la correspondiente potencia en el eje.

La incertidumbre de la energía de salida se calcula como:

$$U_{E_2} = \sqrt{\left(\frac{E_1 - E_0}{P_{in} - P_0}\right)^2 U_{P_n}^2 + \left(\frac{P_n(E_0 - E_1)}{(P_{in} - P_0)^2}\right)^2 U_{P_{in}}^2 + \left(\frac{P_n(E_1 - E_0)}{(P_{in} - P_0)^2}\right)^2 U_{P_0}^2 + \left(\frac{P_n}{P_{in} - P_0}\right)^2 (U_{E_1}^2 + U_{E_0}^2)}$$

**ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

El ensayo con carga se realizó a algunos motores, en una de las áreas de la empresa CEPIL, los cuales fueron seleccionados atendiendo a su potencia y utilización en el proceso productivo, por la influencia que tienen en la eficiencia de la fábrica (tabla 1).

Para realizar los ensayos se utilizó un analizador de redes marca: CHAUVIN ARNOUX , modelo: CA 8334, el cual es conectado al motor en cada una de sus fases. Cada medición se efectuó con intervalos de un segundo para obtener una gráfica lo más exacta posible.

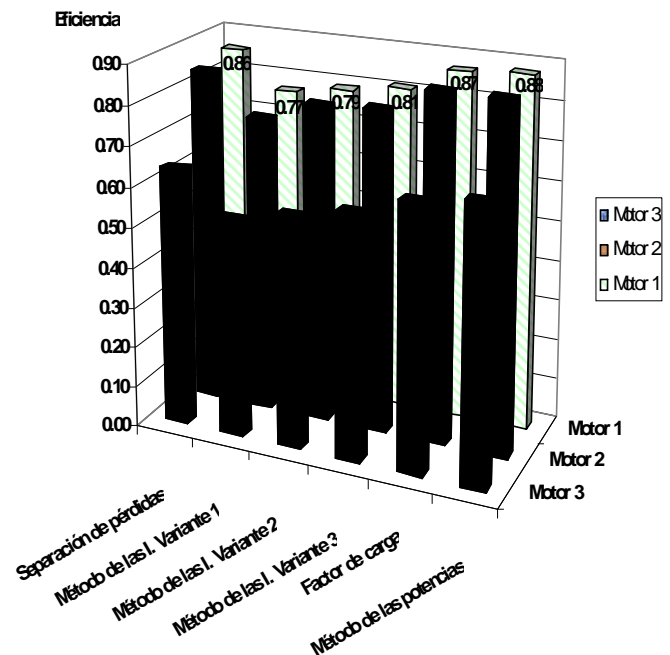
Motores ensayados					
Área	Motor	V <sub>n</sub> (V)	I <sub>n</sub> (A)	P <sub>n</sub> (kW)	η <sub>n</sub> (%)
Encerdado	Motor 1	220/440	6,8/3,9	1,8	95
Encerdado	Motor 2	230/460	6,8/3,9	1,8	93
Encerdado	Motor 3	230/460	6,8/3,9	1,8	93

Al determinar la eficiencia por los métodos propuestos, se obtienen los siguientes resultados:

A continuación se muestran los gráficos de los métodos para una mejor comparación de los resultados (figura 1).

Después de analizar los datos obtenidos y los resultados, es posible determinar la eficiencia de los motores que operan en régimen continuo con carga variable en el tiempo, se pueden usar cualquiera de los métodos propuestos en este trabajo, a pesar de las diferencias existentes entre ellos, producto de las consideraciones hechas en el desarrollo de cada método. No obstante, se debe escoger el de mayor exactitud y de menor incertidumbre, para un mejor resultado a la hora de determinar el potencial de ahorro de la empresa.

Método empleado	η Motor 1	η Motor 2	η Motor 3
Separación de pérdidas	0,86	0,84	0,64
Método de las corrientes (Variante)	1	0,77	0,74
	2	0,79	0,79
	3	0,81	0,80
Factor de carga	0,87	0,86	0,65
Método de las potencias	0,88	0,86	0,67



Valores de eficiencia con diferentes métodos de cálculo.

## CONCLUSIONES

Se confeccionaron varios métodos para determinar la eficiencia de los motores de inducción que operan en régimen continuo con carga variable, a partir de métodos ya existentes para motores con carga constante.

Se plantean las expresiones para el cálculo de la incertidumbre de cada método, facilitando la selección de uno u otro, a la hora de precisar la eficiencia, de acuerdo con el grado de exactitud que se desee.

En los motores de la empresa en que se aplicaron los métodos analizados se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Los motores están subcargados.
2. Tienen un bajo factor de potencia.
3. Las pérdidas rotacionales elevadas.

## RECOMENDACIONES

Continuar desarrollando el cálculo de la incertidumbre para valorar la selección del método a emplear en la determinación de la eficiencia de un motor en un caso determinado.

Al aplicar cualquiera de los métodos planteados a una empresa dada, determinar el potencial de ahorro de la misma.

## REFERENCIAS

1. Norma IEEE. Standard 112 A.
2. Norma IEC 6034-2. Internacional Electrotechnical Comisión.
3. Norma JEC-37. Japan Electrotechnical Comisión 1966.
4. Norma BS-269. British Standard. 1979.
5. Norma SOVIETICA GOST 7217-79. Maquinas Eléctricas Asíncronas.

## BIBLIOGRAFÍA

**Becnel, C.L.:** "Determining Efficiency Field Testing", IEEE trans I. A., 23(3):440-443, May-June, 1987.

**Costa Montiel, Ángel:** "Curso de caracterización energética y ahorro de energía en motores de inducción", CIPEL, Ciudad de La Habana, Cuba, 2005.

**Ivanov, I.:** Máquinas eléctricas, t. I,II,III, Editorial Mir, Moscú, 1984.

**John S., Hsu:** Señor Member, IEEE, John D. Kueck, Comparison of Induction Motor Field Efficiency Evaluation Methods.

**Kostenco, M. P. y L. M. Piotrovski:** Máquinas eléctricas, Editorial Mir, Moscú, 1976.

**Litman, T.:** Efficient Electric Motor Systems Handbook, Publishing, USA, 1995.

**Rosa Masdueño, Elías de la.:** "Metodología para la determinación y mejoramiento de la eficiencia de los motores asíncronos en la industria", Universidad de Camagüey, Cuba, 1998.

-----: "Eficiencia en accionamientos con motores asíncronos y carga cíclica, Universidad de Camagüey, Cuba, 2006.

**8. Rosa Masdueño, Elías de la y Michel Barrios:** "Ahorro de energía eléctrica en los motores trifásicos", Universidad de Camagüey, Cuba, 2006.

**9. Vilagaragut Llanes, Mirian :** "Métodos para la determinación de la eficiencia energética en los motores de inducción trifásicos", CIPEL, Ciudad de La Habana, Cuba, 2003.

## AUTORES

**Daynell Santana Echevarría**

Ingeniero Electricista, Instructor, Universidad de Camagüey, Camagüey Cuba

e-mail: daynell.santana@reduc.edu.cu

**Rolando Madiedo Comendador**

Ingeniero Electricista, Profesor Auxiliar, Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba

e-mail: rolando.madiedo@reduc.edu.cu

*La Dirección de Publicaciones Periódicas del Instituto Cubano del Libro, en el marco de la XVI Feria Internacional del Libro, otorgó a la Revista Ingeniería Energética un diploma por el XXX Aniversario de su fundación, así como por su destacada labor en las investigaciones, trabajos de desarrollo y soluciones directas a la producción y la industria, vinculados a la energía y su empleo.*

