

**TITULO: “Efecto del desbalance de tensión sobre la eficiencia de motores asincrónicos. Evaluación en la estación experimental del Central Ciudad Caracas.”**

**TITLE: “Effect of voltage unbalance on efficiency of asynchronous motors. Evaluation in the experimental station of Ciudad Caracas sugar mill.”**

Authors:

**MSC. Julio R. Gómez Sarduy**  
[jugosa@fmec.ucf.edu.cu](mailto:jugosa@fmec.ucf.edu.cu)

**Dr. Marcos A. de Armas Teyra**  
[marmas@fmec.ucf.edu.cu](mailto:marmas@fmec.ucf.edu.cu)

**Dr. Precy R. Viego Felipe**  
[pviego@fmec.ucf.edu.cu](mailto:pviego@fmec.ucf.edu.cu)

Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente Universidad de Cienfuegos, Cuba

## **Resumen**

En las fábricas de azúcar con plantas sincronizadas a la red nacional es fundamental la reducción de las pérdidas de energía eléctrica. En estas condiciones, la reducción en el consumo interno de energía eléctrica incrementa la contribución de la industria al balance de energía renovable y a los esfuerzos a favor del medio ambiente. La implementación de programas y estrategias para incrementar la eficiencia de los motores eléctricos en la industria azucarera, comienza identificando todas las oportunidades, así como aquellas condiciones de explotación que afectan el funcionamiento de la maquinaria eléctrica. En este sentido, un aspecto que debe ser tratado es el relacionado con la mala calidad de la energía eléctrica, específicamente, los desbalances de tensión.

Los efectos negativos del desbalance de tensión en los motores eléctricos ha sido bien estudiado durante mucho tiempo en los laboratorios de centros de investigación. Sin embargo, esto no ha sido así en condiciones de campo debido a que se requiere de instrumentos especiales y ensayos con gran invasividad que no son comunes en un ambiente industrial. En el central Ciudad Caracas se montó una estación experimental para evaluar el efecto de diferentes tipos de desbalance de tensión sobre los motores eléctricos. El motor bajo prueba es usado como prototipo a fin de desarrollar un modelo más general aplicable a condiciones industriales. La precisión del modelo se verificó con los resultados experimentales.

**Palabras claves:** industria azucarera, desbalance de tensión, motores asincrónicos

## **Summary**

Reduce electric energy losses is fundamental in sugar factories synchronized to the national grid. In this conditions, any reduction in the internal consumption of electric power increase the contribution of the sugar industry to the renewable energy balance and to the sustainable and friendly environment. The implementation of programs and strategies to increase the efficiency of electric motors in the sugar industry start identifying all the opportunities as well as those conditions of exploitation of the electric machinery. In this sense, one aspect to be focused on is the power quality related to unbalance voltage power supplies.

The negative effects of the unbalance voltage on the electric motors have been studied long age in laboratory's research centers. The same isn't true in field condition because it requires of special instruments, tools and invasiveness not common on this environment. In Ciudad Caracas sugar mill, an experimental station was mounted in the electric power station to evaluate the effect of different types of voltage unbalance on electric motors. The motor under proof is used as a prototype in order to develop a model applicable to more general electric motors in industrial conditions. The accuracy of the model is verified with experimental results.

**Key words.** Sugar industry, unbalanced voltages, asynchronous motors

## **Introducción**

Los motores asincrónicos son los principales consumidores de energía eléctrica en la industria azucarera, por lo tanto, en los programas de ahorro y conservación de la energía es importante determinar la eficiencia de los mismos.

La eficiencia de un motor asincrónico operando en una fábrica de azúcar, se ve afectada por diferentes causas entre las que se encuentra, también, los problemas de calidad de la energía eléctrica. Si el motor opera en una red de suministro eléctrico con desbalance de tensión, además de reducir su vida útil, sobrecalentamiento, vibraciones, etc, el usuario tiene que asumir un costo adicional por incremento de la demanda y consumo de energía[1,2]. Cuando esta condición está presente, la evaluación de estas pérdidas debe ser considerada y se deben tomar las medidas necesarias para disminuirlas, ya que la reducción del consumo interno de energía eléctrica constituye una reserva importante para aumentar efectividad económica, debido a que un kWh ahorrado es un kWh vendido o dejado de consumir del SEN. Para esto, es necesario establecer un modelo que permita, en condiciones de campo, evaluar la eficiencia operacional del motor asincrónico a partir del grado y tipo de desbalance de tensión que exista, y teniendo en cuenta la variación de los parámetros del rotor con el campo de secuencia negativa que aparecen en condiciones de desbalance. Con el objetivo de establecer y validar el modelo, se montó una instalación de pruebas aprovechando el equipamiento existente en la planta eléctrica de la EA “Ciudad Caracas” en la Provincia de Cienfuegos, que permite evaluar un motor como prototipo y comprobar el modelo propuesto.

## Desarrollo

### Instalación de prueba.

La instalación utilizada se muestra en la Fig. 1. El motor a probar acciona una máquina de cd calibrada, que funciona como generador alimentando una carga resistiva. La potencia mecánica es calculada conociendo la potencia eléctrica de salida del generador y añadiéndole las pérdidas conocidas para la velocidad de trabajo y la corriente de campo establecida. La potencia eléctrica de entrada al motor y los valores de tensión y corrientes son medidos con un analizador de redes y descargados en una PC. La velocidad del conjunto se mide con un tacómetro óptico. Las pérdidas en el motor están dadas por la diferencia entre la potencia eléctrica de entrada y la potencia mecánica desarrollada.

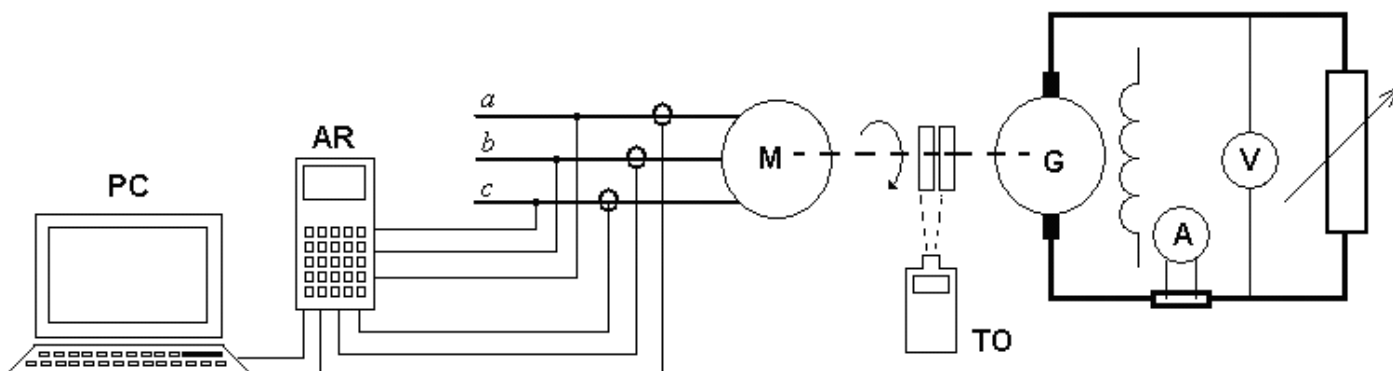


Fig. 1. Diagrama de la instalación experimental (PC-computadora personal, AR-analizador de redes, M-motor asincrónico, G-generador dc, TO-tacómetro óptico, A-amperímetro, V-voltímetro).

### Máquina calibrada y motor utilizado como prototipo.

La máquina calibrada consiste en un generador dc con separación experimental de sus pérdidas lo que permite el cálculo de la potencia mecánica a su entrada, la cual es igual a la potencia mecánica desarrollada por el motor que la acciona. Rodando la máquina como motor en vacío a diferentes velocidades, se pueden determinar las pérdidas en vacío según:

$$W_o = W\rho + Wh + Ww = (V_A - I_A \times R_A - \Delta Ve) \times I_A \quad (W) \quad (1)$$

Donde:

$W_o$ : pérdidas en vacío, en W.

$W\rho$ : pérdidas por rozamiento de los cojinetes, las escobillas y el aire, en W.

$Wh$ : pérdidas por histéresis, en W.

$Ww$ : pérdidas por corrientes parásitas, en W.

$V_A$ : tensión en la armadura, en V.

$I_A$ : corriente de armadura, en A.

$R_A$ : resistencia de armadura, en  $\Omega$ .

$\Delta Ve$ : caída de tensión por contacto en las escobillas, en V. Se utiliza  $\Delta Ve=1$  V según [3].

Así se obtiene una familia de curvas de pérdidas rotacionales en función de la velocidad y la corriente de campo como se muestran en la Fig. 2.

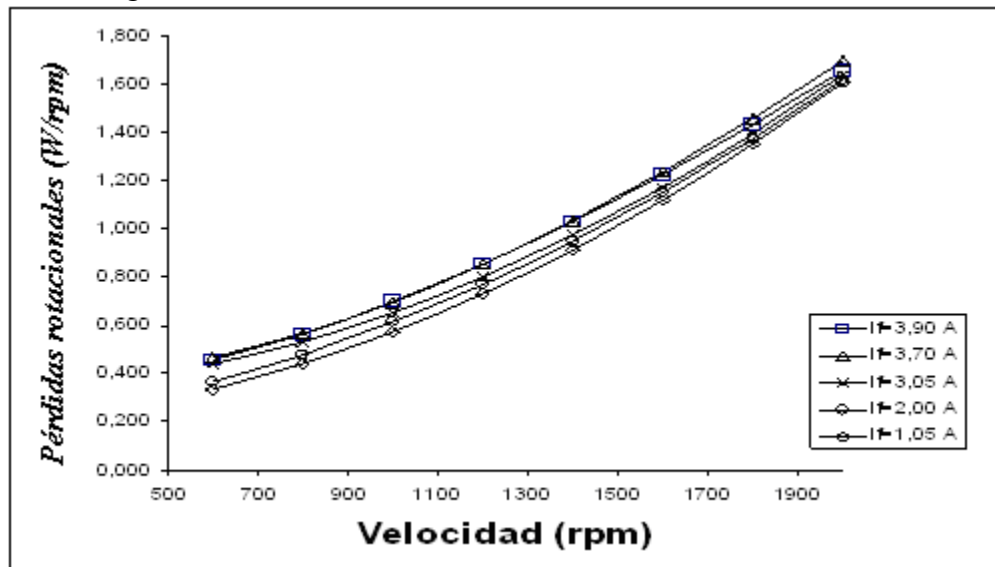


Fig. 2. Pérdidas rotacionales del generador dc en función de la velocidad para diferentes corrientes de campo  $I_f$ .

En esta estación de pruebas el generador trabaja como un generador shunt excitado independiente y alimentando una carga compuesta por un banco de resistencias, las cuales se agregan o retiran a voluntad según el nivel de carga requerido. Para una corriente de excitación constante y conociendo la velocidad, tensión y corriente de armadura, se calcula la potencia eléctrica que entrega como generador y sus pérdidas totales, que están dadas por la suma de las pérdidas rotacionales y las pérdidas de cobre en la armadura, en los interpolos y en la resistencia de contacto de las escobillas. La determinación indirecta de la potencia mecánica que entrega el motor, se realiza a partir de la medición y cálculo de las pérdidas parciales que tienen lugar en el generador más la potencia eléctrica que entrega, asumiendo una eficiencia en el acoplamiento del 99%. Con este valor, y con la medición de la potencia eléctrica de entrada al motor, se calcula su eficiencia operacional.

El motor utilizado como prototipo es un motor asincrónico de jaula de ardilla que se alimenta desde una fuente trifásica, insertando resistencias en las líneas de alimentación para provocar los desbalances de tensión deseados. Los datos nominales del generador y el motor se muestran a continuación.

|                           | <b>Generador dc</b>                      | <b>Motor de asincrónico</b>              |
|---------------------------|--|--|
| <b>Marca y Fabricante</b> | Super Line, Mitsubishi Elect. Co./Japón. | Super Line, Mitsubishi Elect. Co./Japón. |
| <b>Tipo</b>               | SD-EF                                    | SF-E                                     |
| <b>Potencia</b>           | 31 kW                                    | 45 kW                                    |
| <b>Tensión</b>            | 110 V                                    | 440 V                                    |

|                               |          |                  |
|-------------------------------|----------|------------------|
| Corriente                     | 282 A    | 71 A             |
| Velocidad                     | 1770 rpm | 1770 rpm         |
| Conexión                      | shunt    | Delta            |
| Resistencia de Armadura       | 0,0078 Ω | -                |
| Resistencia de los interpolos | 0,0044 Ω | -                |
| Resistencia por fase          | -        | 0.11633 Ω a 29°C |
| Clase de aislamiento          | B        | B                |

### Modelo y resultados experimentales.

El método propuesto para determinar la eficiencia de un motor asincrónico alimentado con tensiones desbalanceadas consiste en determinar los parámetros del circuito equivalente exacto que modela al motor en régimen estable, a partir de los datos de chapa y de valores reales del estado de carga a evaluar; y con estos parámetros se calculan las pérdidas, la potencia desarrollada y la eficiencia del motor.

Para calcular los parámetros del circuito equivalente se requiere de las mediciones de tensiones y corrientes de línea, potencia de entrada  $P_1$  y resistencia  $r_1$  del estator. Las tres primeras se obtienen con el analizador de redes conectado a los terminales de entrada del motor. El valor de la resistencia se mide entre cada par de terminales y se calcula el valor promedio correspondiente a una fase, debiendo ser corregida a la temperatura a carga nominal, o según los valores recomendados en la sección 5-1.1 de [4] para la clase de aislamiento del motor.

En relación con las mediciones mecánicas es necesario conocer la velocidad rotacional  $n$ , obtenida con un tacómetro óptico según recomienda [4]. En este método se emplean los datos de chapa y el punto de carga medido para construir el diagrama circular que se muestra en la Fig. 3 y calcular los parámetros del circuito equivalente del motor que lo determina.

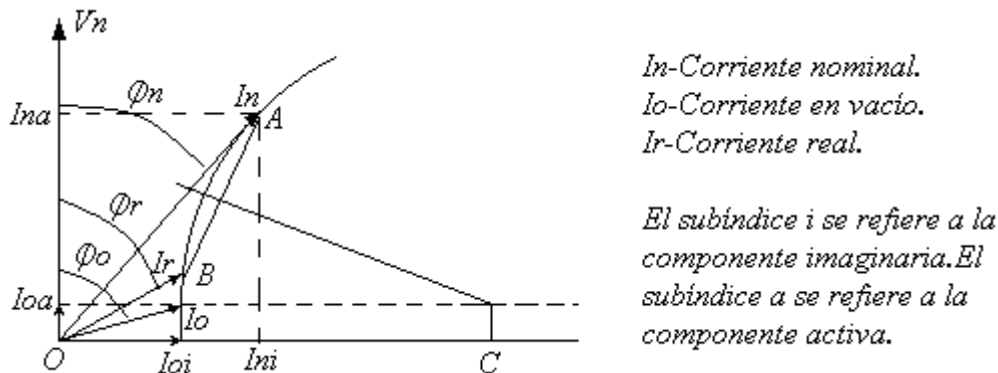


Fig.3. Diagrama circular obtenido de las mediciones de campo y el cálculo estimado de la corriente en vacío.

En esta figura, el punto A está definido por la corriente de fase nominal  $I_n$  y su ángulo de defasaje con relación al tensión de fase nominal  $V_n$ , el cual corresponde al ángulo de factor de potencia nominal  $\Phi_n$ . A partir de las mediciones se determina el punto B correspondiente a la componente de secuencia positiva de la corriente de operación real por la fase  $I_r$  y su ángulo de defasaje  $\Phi_r$  con relación a la componente de secuencia positiva del tensión de fase. El cálculo de la componente activa de la corriente en vacío  $I_{oa}$  se realiza con la siguiente expresión:

$$I_{oa} = I_o \cdot \cos(\varphi_o) = \frac{P_o \cdot 1000}{3 \cdot V_n \cdot I_n} \quad (A) \quad (2)$$

para:  $P_o = P_1 - P_{em_n} - \frac{3 \cdot I_n^2 \cdot r_1}{1000}$  (kW)

Donde:

$P_o$ : pérdidas de núcleo calculadas, en kW.

$P_1$ : Potencia eléctrica de entrada nominal, en kW.

$P_{em_n}$ : Potencia electromagnética nominal, en kW, que tiene en cuenta la suma de la potencia nominal más las pérdidas de fricción y batimiento y las adicionales. Estos dos tipos de pérdidas requieren una evaluación convencional de manera que las primeras se consideran igual a un 0,7% de la potencia de entrada [5] y en las segundas se utilizan los valores recomendados por la norma aplicada por el fabricante del motor analizado en la determinación de la eficiencia [6].

Analíticamente puede determinarse el centro de la circunferencia que define el diagrama circular en el punto de intersección de la mediatriz del segmento  $AB$  con la recta horizontal dibujada en línea discontinua en la Fig. 3 y que está definida por la magnitud de la componente activa de la corriente en vacío. Este punto establece el valor de  $OC$ . Este diagrama circular está definido por los parámetros del circuito equivalente del motor asincrónico con la rama de magnetización colocada a la entrada de alimentación, para el cual la suma de las reactancias de dispersión del estator y del rotor se calculan como:

$$X1 + X2 = \frac{Vn}{2 \cdot \sqrt{(Ini - OC)^2 + (Ina - Ioa)^2}} \quad (\Omega) \quad (3)$$

Para segregar las reactancias se utiliza el criterio NEMA según:

$$X1 = k \cdot X2 \quad (4)$$

donde  $k=1$  para diseños A, D y rotor bobinados;  $k=2/3$  para diseño B y  $k=3/7$  para diseño C. En caso de desconocer el diseño se toma  $X1=X2$ .

Los parámetros de la rama de vacío se calculan como:

$$\dot{Z}m = \frac{\dot{V}n}{\dot{I}o} = (r1 + rm) + j \cdot (x1 + xm) \quad (\Omega) \quad (5)$$

De la expresión anterior se obtienen los valores de  $rm$  y  $xm$ .

El coeficiente de reducción de los parámetros al circuito equivalente exacto se calcula como [3]:

$$\sigma = 1 + \frac{x1}{xm} \quad (6)$$

estando este valor comprendido entre 1,04 y 1,08 para máquinas reales, por lo que se sigue un proceso iterativo para calcular  $\sigma$ ,  $x1$  y  $xm$  y con el valor definitivo de  $\sigma$  se calcula  $x2$  como:

$$x2' = \frac{X2}{\sigma^2} \quad (\Omega) \quad (7)$$

La resistencia del rotor  $r2'$  se obtiene a partir de las pérdidas de cobre nominales del rotor:

$$r2' = \frac{Pem \cdot s}{3 \cdot (I_{2n}')^2 \sigma^2} \quad (\Omega) \quad (8)$$

Donde:

$s$ : es el resbalamiento nominal, en pu.

$I_{2n}'$ : Es la corriente nominal por la rama del rotor, en A, determinada por la diferencia entre la corriente de fase nominal  $In$  y la corriente por la rama de magnetización  $I_o$ .

Para obtener la eficiencia del motor en condiciones de desbalance de tensión, es necesario calcular los parámetros del circuito equivalente de secuencia positiva y negativa, con impedancias diferentes en la rama del rotor debido fundamentalmente al efecto que sobre la resistencia y la reactancia tiene la frecuencia inducida en el rotor, para esto se mantienen los valores de las impedancias del estator y de la rama de magnetización ( $r1$ ,  $x1$ ,

$r_m, x_m$ ) y se determina la impedancia del circuito del rotor para secuencia negativa, con las tensiones y corrientes de esta secuencia ( $V_n$  e  $I_n$ ) como:

$$\dot{Z}_{2n} = \frac{\dot{V}_n - \dot{I}_n \cdot (r_1 + j \cdot x_1)}{\dot{I}_n - \frac{\dot{V}_n - \dot{I}_n \cdot (r_1 + j \cdot x_1)}{r_m + j \cdot x_m}} = r_{2n} + j \cdot x_{2n} \quad (\Omega) \quad (9)$$

Con los parámetros del motor para ambas secuencias, y teniendo los valores de tensión y velocidad del motor se aplica en método convencional y el principio de superposición como en [7] y se determina la eficiencia operacional. El procedimiento se resume en el esquema de la Fig. 4.

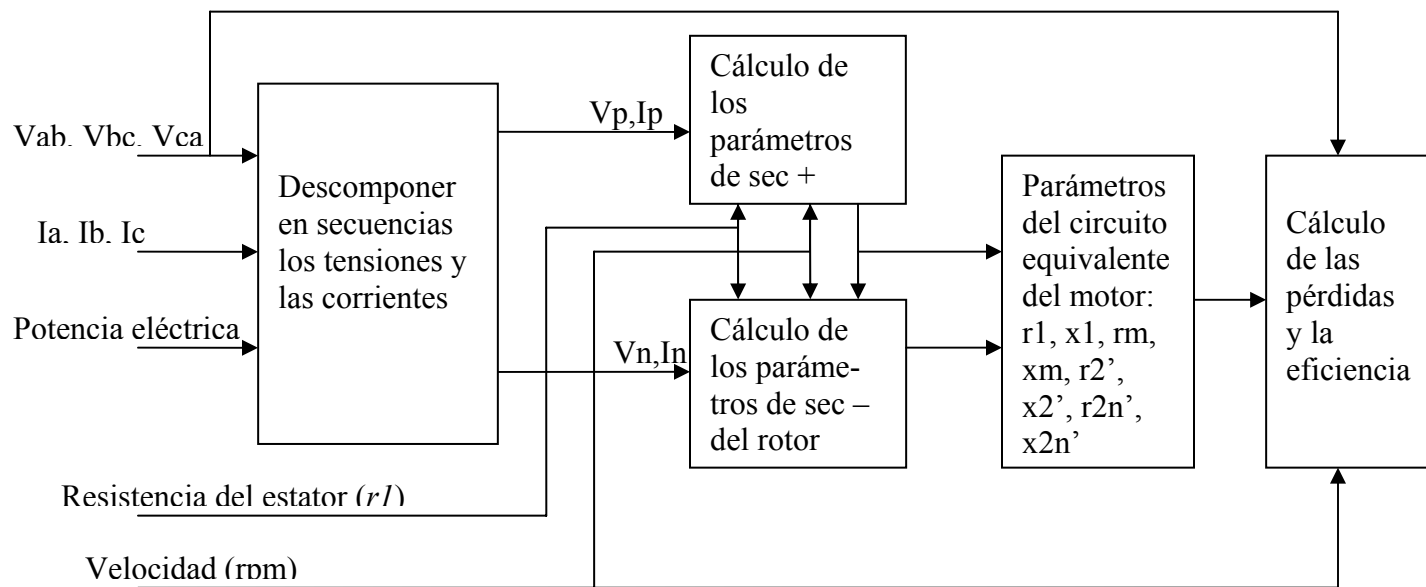


Fig. 4. Modelo para el cálculo de la eficiencia del motor con desbalance de tensión.

Para realizar los cálculos se desarrolló un programa en Matlab 7.0 y a modo de ilustrar la utilidad de la instalación y el procedimiento de validación, se muestra en la Fig. 5 un ejemplo de resultados alcanzados en 5 pruebas con diferentes condiciones de desbalance de tensión.

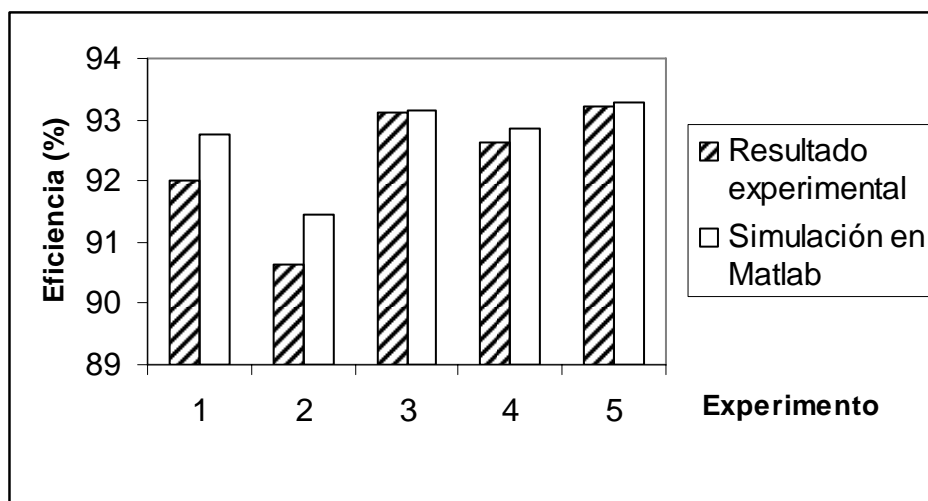


Fig. 5. Eficiencia operacional calculada a partir del modelo propuesto y con la estación experimental.

### Conclusiones.

1-Para determinar la eficiencia de los motores asincrónicos cuando trabajan sometidos a tensiones desbalanceadas en condiciones de campo, es importante que el método aplicado posea, como requerimiento principal, poca invasividad, de manera que pueda ser ejecutado sin dificultad.

2-En este trabajo se ha mostrado la implementación de una estación experimental que aprovecha el equipamiento existente en la planta eléctrica de un central azucarero, para validar un método adecuado para tales fines.

3-El máximo error que se aprecia en los resultados obtenidos es de 0.92%, siendo la simulación optimista con relación a la práctica experimental en esta primera etapa de la investigación. La fuente de error de mayor peso lo constituye la evaluación convencional de las pérdidas de fricción y batimiento y las adicionales calculadas como se describe en la explicación del método.

### **Bibliografía.**

[1] Y. J. Wang. "Analysis of effects of three-phase voltage unbalance on induction motor with emphasis on the angle of the complex voltage unbalance factor". IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 16, No. 3, September 2001.

[2] C. Y. Lee. "Effects of unbalanced voltage on operation performance of a three-phase induction motor". IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 2, June 1999.

[3] A.I.Voldek. Máquinas eléctricas. Tomo I. pp 170. Editorial Pueblo y Educación. Cuba. 1985.

[4] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. IEEE Standar 112-1996.

[5] M. P. Kostenko, L. Piotrovsky. Máquinas eléctricas. Tomo II. Editorial MIR . Moscú. 1976.

[6]De Armas, Marcos A. "Temas avanzados y eficiencia operacional de las máquinas eléctricas asincrónicas". Curso de postgrado. Universidad de Cienfuegos Nov. 2001.

[7] Gómez Sarduy, J., de Armas Teyra, M., Viego Felipe, P. "Evaluación de las pérdidas de energía de un motor asincrónico trabajando en régimen desbalanceado".Memorias del III Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente. Universidad de Cienfuegos. Cuba. Abril del 2004.