



Influencia de la incertidumbre y su distribución difusa en la evaluación del potencial de ahorro de energía de la sustitución de motores

Elías de la Rosa
Percy R. Viego
Ángel Costa

Recibido: Julio del 2006
Aprobado: Septiembre del 2006

Resumen / Abstract

Se analiza la influencia de la incertidumbre de las mediciones o de la declaración de la eficiencia de un motor en la evaluación del potencial de ahorro de energía, para la sustitución de motores que trabajan con baja eficiencia. Se establece que esta no es una simple relación de sustituir un motor aparentemente más eficiente por otro y que la probabilidad de la dispersión de la eficiencia es importante en la toma de decisiones.

Palabras clave: Motor de inducción, eficiencia, matemática difusa

It is analyze the influence of the uncertainty in the measurement and declaration of motor efficiency in the evaluation of the energy saving potential for the substitution of low efficiency motors. It is established that it is not a simple relation of substituting an apparently greater efficiency motor for another and that the probability of the efficiency dispersion is important in the decision.

Key words: Induction motor, efficiency, uncertainty, fuzzy

INTRODUCCIÓN

Desde la crisis energética de 1972 hasta los últimos acontecimientos que han llevado el precio del petróleo por encima de los 50 USD el barril con pronósticos de aumentar hasta 80 USD en un futuro no lejano, el tema del ahorro energético se ha convertido en una prioridad tanto en los procesos de fabricación industrial como de la esfera de los servicios de alta demanda energética como son el turismo y la salud.

Los motores eléctricos y en especial los motores de inducción, constituyen los principales consumidores de energía en estos sectores de alta importancia económica, siendo aproximadamente responsables del 60 % del consumo. Si antiguamente el precio inicial era un factor determinante, con la elevación del precio

de la electricidad en más de cinco veces, el consumo de energía se convierte en el componente principal del costo sobrepasando el precio inicial del motor en menos de un año.¹

En las muchas publicaciones²⁻⁵ sobre el tema de sustitución de motores con baja eficiencia o medición de la eficiencia en la industria, existe generalmente un factor que no ha sido tomado en cuenta. Este es que la simple sustitución de un motor cuya eficiencia medida sea inferior que la nominal del posible sustituto, no garantiza el mejoramiento de la eficiencia, debido a que existe un rango de valores de eficiencia probable, a consecuencia de la incertidumbre en la medición y declaración de la eficiencia.

El objetivo de este trabajo es el análisis científico de dicho problema que puede llevar a la toma de decisiones erróneas en el remplazo de un motor por otro de mayor eficiencia.

DESARROLLO

Incertidumbre en la declaración de eficiencia

Para comprender el significado de la eficiencia nominal de un motor es necesario conocer cómo se forma este dato de chapa.⁶ El procedimiento puede diferir de un país a otro de acuerdo con su norma nacional, aunque en general los países productores siguen las recomendaciones de la IEC, en específico IEC 60034.⁷ De acuerdo con esta norma, la declaración de eficiencia debe ajustarse a que las pérdidas se conozcan con una incertidumbre de 15 % o mejor para motores de menos de 50 kW y de 10 % para motores mayores. Entonces los valores nominales de eficiencia van a estar estandarizados para tener en cuenta esta incertidumbre. La norma NEMA MG1 12-8 establece estos valores de eficiencia y para cada uno de ellos cuál es el valor mínimo que el fabricante debe garantizar. Un ejemplo de estos valores⁴ se muestra en la tabla I.

Se puede observar que, en primer lugar, los valores nominales saltan de tal manera que acomodan la eficiencia a la incertidumbre de las pérdidas. Para una eficiencia nominal del 93,6% la misma podría estar en los límites de 94,2,2 % a 93,0 %, si las pérdidas tienen una incertidumbre del 10 %. Los llamados valores mínimos, son aquellos en los que la incertidumbre está aproximadamente multiplicada por un factor de seguridad de $k = 2$, por tanto, para este caso sería 92,4 %.

Nominal	Mínimo	Nominal	Mínimo
95,0	94,1	90,2	88,5
94,5	93,6	89,5	87,5
94,1	93,0	88,5	86,5
93,6	92,4	87,5	85,5
93,0	91,7	86,5	84,0
92,4	91,0	85,5	82,5
91,7	90,2	84,0	81,5
91,0	89,5	82,5	80,0

Los fabricantes toman una muestra de los motores que fabrican y los someten a ensayos para determinar entre otras características la eficiencia a carga nominal. Si han ensayado diez motores, estos pueden tener valores de eficiencia cuya dispersión debe estar dentro de la incertidumbre establecida en las normas, o de lo contrario, existen problemas en el proceso de manufactura.

El valor promedio de esta eficiencia se compara con la tabla de valores nominales estandarizados y se toma el valor más próximo inferior; es decir si la eficiencia de un grupo de motores tuvo una media de 90,4 %, se selecciona 90,2 que es el más próximo inferior en la tabla.

Esta eficiencia a su vez puede ser determinada por distintos métodos o variantes, de ellos por ejemplo, el diagrama circular o el del dinamómetro, y a su vez de acuerdo con la norma nacional seguida, se tienen consideraciones distintas en el tratamiento de las pérdidas como por ejemplo, la norma japonesa JEC-37⁸, que desprecia las pérdidas adicionales y la IEEE 112⁹ las considera de varias formas dependiendo del método o los datos iniciales. Así, la eficiencia determinada por una norma puede ser distinta de la determinada por otra. Esto significa que un mismo motor al que se le aplica la norma norteamericana tiene una eficiencia menor que si se le aplica la norma japonesa, pudiendo alcanzar valores nominales diferentes, esto se analiza en distintos estudios comparativos.¹⁰

Se puede admitir entonces que la eficiencia nominal de un motor está dada por una dispersión de carácter aleatorio de valores que comprende desde el valor central más o menos una desviación que puede interpretarse como una desviación estándar para los efectos estadísticos. Esta desviación puede ser tomada como la dispersión de eficiencia obtenida por la incertidumbre con que se garantizan las pérdidas. Si en vez de ello se tomaran los valores de eficiencia mínima, se tendría un valor exagerado de esta dispersión. Este valor mínimo no es más que una garantía que ofrece el fabricante.

Incertidumbre en la determinación de la eficiencia en la industria

La incertidumbre en la determinación de la eficiencia en condiciones industriales depende de varios factores como son la precisión de los instrumentos, el método utilizado, y la estabilidad de la carga.

Normalmente esta determinación se realiza siguiendo el método de segregación de pérdidas o una mezcla

del método del dinamómetro con segregación de pérdidas y los instrumentos digitales actuales permiten obtener incertidumbres en la medición que están dentro del rango que establece IEC 60034-2; al respecto, el autor principal de este artículo, ha publicado numerosos trabajos.¹⁰⁻¹²

Por ejemplo, para un grupo de tres motores cuyos datos aparecen en la tabla 2 se obtuvieron valores de eficiencia e incertidumbre con un grado de confianza del 95 % ($k = 2$) que se muestran en la tabla 3.¹¹

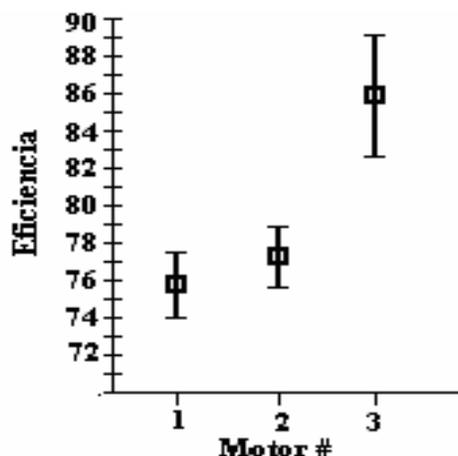
Para un mejor entendimiento del tema se muestran los resultados del gráfico (figura 1).

Tabla 2
Datos de chapa

Motor	Pn (w)	I (a)	V (v)	r/mín
1	3 000	13	220	1 750
2	2 050	5,5	220	1 750
3	5 500	20,1	220	1 750

Tabla 3
Eficiencia e incertidumbres

Motor	Eficiencia	Eficiencia mín	Eficiencia máx
1	0,757±2.0,008 3	0,740	0,774
2	0,772±2.0,008 0	0,756	0,756
3	0,860±2.0,016 0	0,828	0,892



Dispersión de la eficiencia.

1

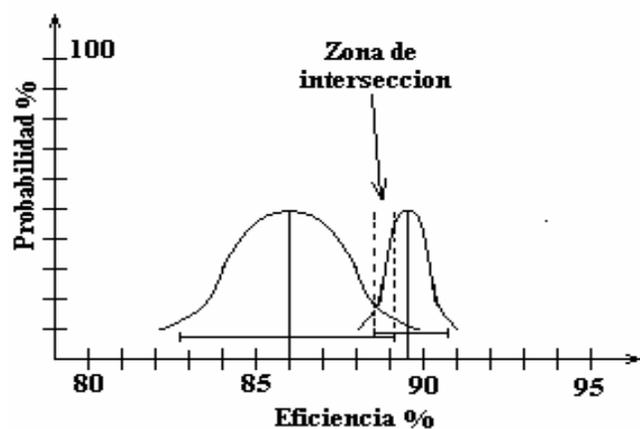
Pudiera pensarse que el motor 3 cuya eficiencia medida es de 86 % puede ser sustituido por otro nuevo con eficiencia de 89,5 %, pero esta decisión puede ser errónea si no analiza la incertidumbre de ambos valores.

Considerando que la dispersión sigue una distribución normal, entonces se puede analizar en un gráfico donde ambas eficiencias estén representadas con su distribución, lo cual aparece en la figura 2.

Del gráfico se puede observar cómo los rangos de eficiencia que para el motor probado van desde 82,8 % hasta 89,2 % y del motor nuevo que van desde 90,6 % hasta 88,5 %, se interceptan, pudiendo decirse que en una primera aproximación el motor sustituto no garantiza un ahorro de energía, pero esta intersección cubre un área que representa una pequeña probabilidad para el motor instalado y menos de la mitad para el motor nuevo, y la probabilidad de que ambos eventos ocurran simultáneamente sería el producto de ambas probabilidades, por lo que puede apreciarse que todavía este motor sustituto puede mejorar la eficiencia con una probabilidad que supera el 80 %.

Entonces puede realizarse el cambio con un grado de confianza aceptable.

Un análisis similar se puede realizar cuando se tienen dos motores cuyas eficiencias han sido medidas en planta.



Intersección entre las probabilidades de los valores de eficiencia.

2

ANÁLISIS CON TÉCNICAS DE NÚMEROS DIFUSOS

Un enfoque atractivo del análisis consiste en la fuzzificación del problema, lo que es una consecuencia de la naturaleza de la medición de la eficiencia, que no constituye un número definido, sino una dispersión de valores probables con distinta probabilidad. A cada valor de la eficiencia con su dispersión asociada se le trata como un número difuso con una incertidumbre igual a la incertidumbre expandida ya conocida.

$$X = X_i \pm U_i \quad \dots(1)$$

Al número difuso X se le asigna el valor X_i con una incertidumbre U_i . En este caso se tendrán dos números difusos que representan las eficiencias a comparar del motor instalado X_1 y su sustituto X_2 .

La comparación de ambos números se puede realizar de varias formas, una es determinando si X_2 pertenece a X_1 y la otra si X_2 no pertenece a X_1 , ambas operaciones difusas son equivalentes por lo que se tomará la segunda, o sea, que los números son diferentes.

Para la comparación se debe primero realizar un cambio de probabilidad a posibilidad que es el concepto usado en la matemática difusa, y se puede sustituir la curva de probabilidad gaussiana por una curva triangular de posibilidad cuyos valores extremos son de cero posibilidad para una desviación del valor central igual a la incertidumbre U . Esto se aprecia en la figura 3.

La no pertenencia de X_2 a X_1 se determina por medio de la expresión:

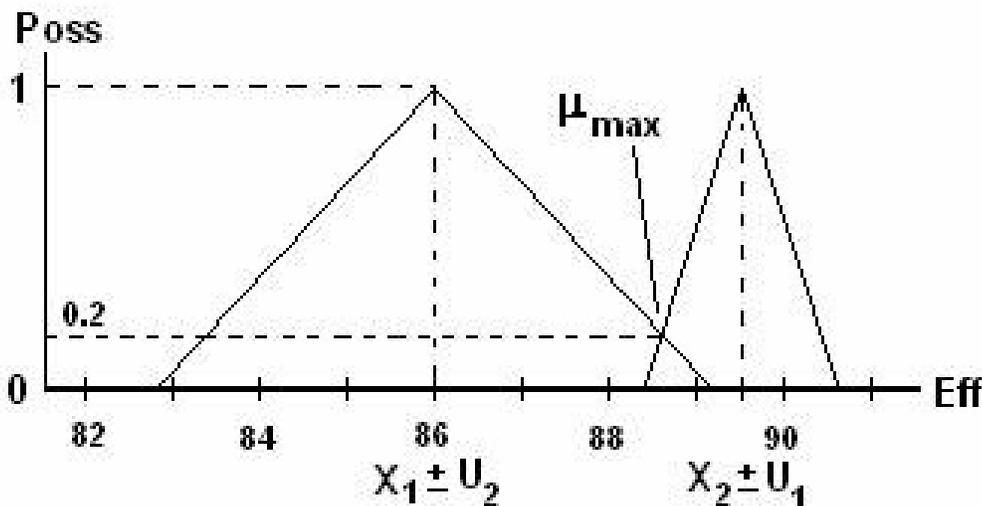
$$P_{oss} = 1 - \mu_{m\acute{a}x} \quad \dots(2)$$

Es decir, que la posibilidad es uno menos el valor máximo de la intersección, para este caso el resultado es 0,8, por lo que se puede asegurar que la eficiencia del motor 2 es distinta de la del motor 1 y por tanto su sustitución mejorará la eficiencia.

La operación difusa anterior es fácil de implementar en las computadoras actuales e incluso puede realizarse con técnicas manuales simplificando la comparación. El valor admisible de la pertenencia se puede determinar por varias técnicas entre ellas criterios de expertos, quedando esto fuera del alcance de este trabajo.

CONCLUSIONES

1. Es necesario el análisis de la incertidumbre con que se conocen las eficiencias al tomar la decisión de cambiar un motor por otro de mayor eficiencia nominal o de trabajo.
2. Despreciar el análisis de incertidumbre puede dar lugar a una falsa declaración de mejora de eficiencia.
3. No solo es necesario conocer la dispersión de valores de eficiencia, sino que su probabilidad ayuda en la evaluación del potencial de ahorro de energía.



Representación difusa.

REFERENCIAS

1. **Brethauer, Dale M.; Richard L. Doughty and Robert J. Puchett:** "The Impact of Efficiency on the Economics of New Motor Purchase, Motor Repair, and Motor Replacement", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.30, No.6, November/December, 1994.
2. **Costa, Ángel y Miriam Vilaragut:** Determinación del comportamiento energético del motor de inducción a partir de sus datos de catálogo y la lectura de las corrientes del estator, III Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente, Cienfuegos, Cuba, 2004.
3. **García, Michel y Percy R. Viego:** Determinación de los parámetros de un motor asincrónico bajo condiciones de ondas no sinusoidales, III Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente, Cienfuegos, Cuba, 2004.
4. **Litman, Todd:** *Efficiente Electric Motor Systems Handbook*, Pennwell Publishing Company, Tulsa, USA, 1995.
5. **Pérez, Ignacio:** Estimación de parámetros energéticos de motores de inducción en servicio, III Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente, Cienfuegos, Cuba, 2004.
6. **Keinz, John and R. Houlton:** "NEMA Nominal Efficiency- What Is it and Why" *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-17, No. 5, Sep./Oct., 1981.
7. *International Electrotechnical Commission Standard. IEC 60034-2*, 1972.
8. *Japan Electrotechnical Commission Standard JEC-37*, 1961.
9. *IEEE Standard 112, Stanadrd Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. IEEE*, 2004.
10. **Rosa, Elías de la:** "Metodología para la determinación y mejoramiento de la eficiencia de los accionamientos eléctricos en la industria", Tesis de maestría, Universidad de Camagüey, 1998.
11. ———: Importance of the Uncertainty in the Efficiency Determination of Induction Motors on Industry, International Conference on Electrical and Computer Engineering ICECE 2003. Bahir Dar University, Ethiopia, 2003.
12. ———: "Errores en la determinación de la eficiencia de los motores en la industria", Memorias del Congreso Internacional Metrología 96", Ciudad de La Habana, Cuba, 1996.

AUTORES

Elías de la Rosa Masdueño

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Profesor Auxiliar, Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba
e-mail:erosa@em.reduc.edu.cu

Percy R. Viego Felipe

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba
e-mail:pviendo@fmec.ucf.edu.cu

Ángel Costa Montiel

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Cujae, Ciudad de La Habana Cuba
e-mail:aacm@electrica.cujae.edu.cu

FÁBRICA DE TRANSFORMADORES

