

MOTORES ELÉCTRICOS DE ALTA EFICIENCIA.

Enrique Ciro Quispe, Luis Fernando Mantilla Peñalba

RESUMEN

Los motores de alta eficiencia empezaron a ser fabricados a mediados de la década de los 70 inicialmente de USA pero aplicación se hizo masiva al llegar el 2000 también en otros países industrializados. Sin embargo su aplicación indiscriminada puede ocasionar inconvenientes técnicos en los procesos productivos cuando no es evaluada correctamente. El propósito de este artículo es dar a conocer las características principales de los motores de alta eficiencia, mencionar las ventajas y limitaciones que presentan y mencionar las ventajas y limitaciones que presentan y mencionan las condiciones mas comunes en que su aplicación es aconsejable.



Este trabajo está licenciado bajo la licencia [Creative Commons Attribution 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/).

Revista Energía y Computación

Facultad de Ingeniería

Universidad del Valle

A.A. 25360

FAX: (92) 339 21 40 Ext. 112

Teléfono: 339 2140 Ext. 124

revista_eyc@univalle.edu.co

energiaycomputacion@gmail.com

<http://energiaycomputacion.univalle.edu.co>

Cali, Valle del Cauca

Colombia

Motores Eléctricos de Alta Eficiencia

Características Electromecánicas, Ventajas y Aplicabilidad



Los motores de alta eficiencia empezaron a ser fabricados a mediados de la década de los 70 inicialmente en USA pero su aplicación se hizo masiva al llegar el año 2000 también en otros países industrializados. Sin embargo su aplicación indiscriminada puede ocasionar inconvenientes técnicos en los procesos productivos cuando no es evaluada correctamente.

El propósito de este artículo es dar a conocer las características principales de los motores de alta eficiencia, mencionar las ventajas y limitaciones que presentan y mencionar las condiciones más comunes en que su aplicación es aconsejable.

PALABRAS CLAVES

Eficiencia, eficiencia energética, motor inducción, NEMA, EPACT.

ABSTRACT

Back in the mid 70's, mainly in USA, started production of high efficiency motors, becoming broadly used in other industrialized countries in the year 2000. However, indiscriminate use may lead to some technical hitch with

GIEN, Grupo de Investigación en Energías. Departamento Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Corporación Universitaria Autónoma de Occidente.

Enrique C. Quispe O., M.Sc.
Profesor Asistente
Corporación Universitaria
Autónoma de Occidente
Cali, Colombia.

Grupo de Sistemas y Accionamientos Eléctricos de Potencia. Departamento Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria

Luis F. Mantilla P., Ph. D.
Profesor Titular de Universidad
Universidad de Cantabria
Cantabria, España.

RESUMEN

production when it is not properly evaluated.

Chief goal of this paper is to know the main characteristics of energy-efficiency motors, point out advantages and drawbacks involved, and at the same time to make mention of the most popular fields where they are highly recommended.

KEYWORDS Efficiency, Energy, Induction Motor, NEMA, EPACT.

1. INTRODUCCIÓN

El constante incremento de los costos de la energía eléctrica y las restricciones establecidas sobre la conservación del medio ambiente hicieron que en los países industrializados como USA y algunos países europeos se dictaran políticas y se aprobaran legislaciones respecto al uso de la energía. Considerando que de la energía total generada en el mundo, aproximadamente el 60% la consumen los motores eléctricos y que el motor eléctrico más usado es el asíncrono de jaula de ardilla, surgió entre las medidas más prometedoras para el ahorro de la energía, establecer el incremento obligatorio de la eficiencia de estos motores. Esta idea fue reforzada cuando un estudio realizado en 1990 por el Departamento de Energía de los Estados Unidos de América mostró que para el año 2010, la industria podría ahorrar 240 mil millones de Kwh anualmente reemplazando motores y accionamiento de eficiencia estándar, por otro que fueran solo de 2 a 6% más eficientes.

En los países subdesarrollados, este tipo de política energética a demorado en establecerse y las cifras que se encuentran en cuanto al uso de motores más eficientes son notablemente inferiores a las de los países industrializados. Una de las razones es que en las practicas tradicionales de compra no se evalúa el costo real de la energía, entre otras cosas, porque no se comprende la relación entre la eficiencia y los costos totales durante la vida útil del equipo. Así, los compradores se concentran con frecuencia en el bajo costo inicial. No se comprende suficientemente que los motores y acondicionamientos con mayor eficiencia, aunque son mas caros inicialmente, gracias a los costos de operación más bajos, compensan la

diferencia en un plazo normalmente apropiado. Otra razón es la poca información que tienen los ingenieros y técnicos respecto a los motores de alta eficiencia. Este desconocimiento da inseguridad en el momento de la aplicación y en algunos casos puede ocasionar inconvenientes en la operación de los motores. Es importante entonces conocer cuales son las características electromecánicas de los motores de alta eficiencia, sus ventajas y las limitaciones que pueden presentar en su aplicación.

El propósito de este artículo es dar a conocer las características principales de los motores de alta eficiencia, mencionar las ventajas y limitaciones que presentan y mencionar las condiciones más comunes en que su aplicación es aconsejable.

2. EFICIENCIA DE LOS MOTORES ELECTRICOS

Puede decirse que la eficiencia de un motor eléctrico es la medida de la capacidad que tiene el motor de convertir la energía eléctrica en energía mecánica. La potencia eléctrica correspondiente medida en watts (w) entra por los terminales del motor y la potencia mecánica medida en watts o HP que sale por el eje. La eficiencia (EF) del motor puede expresarse como:

$$EF\% = \frac{\text{Potencia Mecánica de Salida}}{\text{Potencia Eléctrica de Entrada}} \times 100$$

Y como:

Potencia mecánica de salida = Potencia eléctrica de entrada – Pérdidas

Se tiene que :

$$EF\% = \left(1 - \frac{\text{Pérdidas}}{\text{Pot. eléctrica de entrada}}\right) \times 100$$

3. NATURALEZA DE LAS PÉRDIDAS EN LOS MOTORES ELÉCTRICOS

Se tiene por pérdidas la potencia eléctrica que se transforma y disipa en forma de calor en el proceso de conversión de la energía eléctrica en mecánica que ocurre en el motor. Las pérdidas

por su naturaleza se pueden clasificar en 5 áreas: pérdidas en el cobre del estator, pérdidas en el cobre del rotor, pérdidas en el núcleo, pérdidas por fricción y ventilación y pérdidas adicionales.

3.1 Pérdidas en los conductores.

Las pérdidas en los conductores se dividen en dos zonas: estator (I^2R en las bobinas del estator) y rotor (I^2R en los bobinados del rotor). Estas pérdidas dependen del cuadrado de la corriente.

3.1.1 Pérdidas en los conductores del estator.

Estas pérdidas son una función de la corriente que fluye en el devanado del estator y la resistencia de ese devanado. Son mínimas en vacío y se incrementan al aumentar la carga.

En función del factor de potencia (FP), la corriente de línea en el estator puede expresarse como:

$$I_L = \frac{\text{potencia eléctrica de entrada}}{\sqrt{3} * \text{Voltaje de línea} * FP}$$

Cuando se desea mejorar el comportamiento del motor, es importante reconocer la interdependencia entre la eficiencia (EF) y el factor de potencia (FP). Si se despeja el factor de potencia la ecuación se reescribe:

$$FP = \frac{\text{Potencia mecánica de salida}}{\sqrt{3} * \text{voltaje de línea} * I_L * EF}$$

Por lo tanto si se incrementa la eficiencia, el factor de potencia tendrá a decrecer. Para que el factor de potencia permanezca constante, la corriente del estator debe reducirse en proporción al aumento de la eficiencia. Si se pretende que el factor de potencia mejore, entonces la corriente debe disminuir más que lo que la eficiencia aumente. Desde el punto de vista del diseño, esto es difícil de lograr debido a que hay que cumplir otras restricciones operacionales como el momento máximo. Por otra parte la corriente de línea se puede expresar:

$$I_L = \frac{\text{Potencia mecánica de salida}}{\sqrt{3} * \text{voltaje de salida} * FP * EF}$$

La expresión hace evidente que las pérdidas en el estator (I^2R) serán inversamente proporcionales al cuadrado de la eficiencia y del factor de potencia. Adicionalmente las pérdidas en los conductores del estator dependen de la resistencia del bobinado. Para un motor dado la resistencia del bobinado es inversamente proporcional al peso del bobinado del estator, es decir a más material conductor en el estator menos pérdidas.

3.1.2 Pérdidas en los conductores del rotor.

Son directamente proporcionales a la resistencia del bobinado rotórico, dependen del cuadrado de la corriente que circula en el bobinado rotórico (barras y anillos) y dependen del flujo magnético que atraviesa el entrehierro. Son prácticamente cero en vacío y se incrementan con el cuadrado de la corriente en el rotor y también se incrementan con la temperatura. Las pérdidas en el rotor se pueden expresar en función del deslizamiento:

$$\text{Pérd. Rotor} = \frac{(PMS + \text{Pérdidas } F \text{ y } V)}{1 - S} S$$

PMS. : Potencia Mecánica de Salida
F y V : Fricción y Ventilación
S : Deslizamiento

3.2 Pérdidas en el núcleo magnético.

Estas pérdidas tienen dos componentes, las pérdidas por corrientes de Eddy y las pérdidas por el fenómeno de histéresis, incluyendo las pérdidas superficiales en la estructura magnética del motor. Las pérdidas en el núcleo del rotor debido al flujo magnético principal, son virtualmente cero.

3.2.1 Pérdidas por Histéresis.

Son causadas debido a la propiedad de remanencia que tienen los materiales magnéticos al ser excitados por un flujo magnético en una dirección. Como el flujo de excitación está cambiando de dirección en el núcleo magnético, la remanencia hace que se forme el ciclo de histéresis, cuya área está relacionada por la energía gastada en magnetizar y desmagnetizar

el núcleo continuamente. Estas pérdidas dependen del flujo máximo de excitación, de la frecuencia de variación del flujo y de la característica del material que determina el ancho del ciclo de histéresis.

3.2.2 Pérdidas por corrientes de Eddy.

Son causadas por las corrientes inducidas o corrientes de Eddy que circulan en las laminas magnéticas del núcleo estatórico las que son inducidas por el flujo magnético giratorio estatórico. En efecto de acuerdo a la ley de Faraday el campo magnético variable en el tiempo crea campos eléctricos de trayectoria cerrada en el núcleo magnético y como el acero es un material conductor estos campos hacen circular corrientes (corrientes de Eddy) a través de su trayectoria cerrada, por esta razón el núcleo magnético se hace de laminas magnéticas. Por lo tanto estas pérdidas dependen del flujo magnético máximo, de la frecuencia de variación del flujo magnético y de la resistividad del acero magnético.

3.3 Pérdidas por fricción y ventilación.

Las pérdidas por fricción y ventilación son debidas a la fricción en los rodamientos y a las pérdidas por resistencia del aire al giro del ventilador y de otros elementos rotativos del motor.

La fricción en los rodamientos es una función de las dimensiones de este, de la velocidad, del tipo de rodamiento, de la carga y de la lubricación usada. Estas pérdidas quedan relativamente fijadas para un tipo de diseño, y debido a que constituyen un porcentaje pequeño de las pérdidas totales del motor, los cambios que se pueden hacer en el diseño para reducirlas no afectan significativamente la eficiencia del motor.

3.4 Pérdidas adicionales en carga.

Son pérdidas residuales difíciles de determinar por medio de mediciones directas o de cálculos. Estas pérdidas están relacionadas con la carga y general mente se suponen que varían con el cuadrado del momento de salida.

La naturaleza de estas pérdidas es muy compleja. Están en función de muchos factores de diseño y de fabricación del motor. Algunos de los elementos que influyen en estas pérdidas

son: el diseño del devanado, la relación entre la magnitud del entrehierro y la abertura de las ranuras; la relación entre el número de las ranuras del estator y del rotor, la inducción en el entrehierro; las condiciones en la superficie del rotor, el tipo de contacto superficial entre las barras y las laminaciones del rotor.

3.5 Distribución de las pérdidas.

Dentro de un intervalo limitado de eficiencia, las distintas pérdidas analizadas son independientes unas de las otras. Sin embargo, cuando se procuran mejoras sustanciales en la eficiencia, se encuentra que las mismas están fuertemente entrelazadas. El diseño final de un motor es un balance entre las eficiencias pérdidas, con el objetivo de obtener una eficiencia elevada y aun poder satisfacer otros requerimientos operacionales como el momento de arranque, la corriente de arranque, el momento máximo y el factor de potencia.

La forma en que se distribuye relativamente estas pérdidas depende del tipo y tamaño del motor y, para tener una idea general, en la Tabla 1 se muestra como se distribuyen las pérdidas en motores de diseño NEMA B de distinta potencia nominal. En esta tabla se puede evidenciar que a potencia nominal resulta relativamente amplio el intervalo que varia cada una de las pérdidas dependiendo de la potencia del motor.

Tabla 1. Distribución típica de pérdidas en los motores diseño NEMA B.

Potencia (HP)	5	50
Tipo de pérdidas	% Pérdidas	% Pérdidas
Conductores Estator	40	38
Conductores Rotor	20	22
Núcleo Magnético	29	20
Fricción y Ventilación	4	8
Adicionales en Carga	7	12
Eficiencia %	83	90.5

Potencia (HP)	100	200
Tipo de pérdidas	% Pérdidas	% Pérdidas
Conductores Estator	28	30
Conductores Rotor	18	16
Núcleo Magnético	13	15
Fricción y Ventilación	14	10
Adicionales en Carga	27	29
Eficiencia %	91.5	93

Fuente: Andreas Jhon ENERGY-EFFICIENT ELECTRIC MOTORS. Second Edition. Copyring

Marcel Dekker, Inc. New York, USA 1992.

Es importante para los diseñadores entender la forma en que se distribuyen las pérdidas con el objetivo de realizar cambios para aumentar la eficiencia del motor. En general la distribución de pérdidas promedio para los motores diseño NEMA B puede resumirse en la tabla 2.

Tabla 2. Distribución de pérdidas Promedio Motores Diseño NEMA B

Componentes Pérdidas en el Motor	% Pérdidas totales
Pérdidas Conductores Estator	37
Pérdidas Conductores Rotor	18
Pérdidas Núcleo Magnético	20
Pérdidas Fricción y Ventilación	9
Pérdidas Adicionales en carga	16

4. INCREMENTO DE LA EFICIENCIA EN LOS MOTORES ASINCRÓNICOS

El incremento de la eficiencia en los motores asincrónicos de jaula de ardilla se logra con la reducción de sus pérdidas.

Según aumenta la potencia de salida y en consecuencia la eficiencia nominal, se incrementa también el grado de dificultad para mejorar la eficiencia y por lo tanto el costo de mejorar la eficiencia de un motor. Considerando solamente las pérdidas en los conductores del estator y del rotor para mejorar un punto en la eficiencia, se requiere un aumento creciente en la reducción de estas pérdidas, según se puede observar en la tabla 3, confeccionada para valores promedio de los diseño NEMA B.

Tabla 3. Reducción requerida en las pérdidas en los conductores para aumentar la eficiencia en un punto.

HP	Eficiencia Original	Eficiencia Incrementada	Reducción requerida en pérdidas en conductores
1	73	74	8
5	83	84	11
25	89	90	16
50	90.5	91.5	19
100	91.5	92.5	28
200	93	94	38

Las pérdidas en el motor pueden reducirse hasta alrededor de un 50% a través del uso de mejores materiales, optimizando la geometría, ajustando

mejor el motor con la carga y mejorando el proceso de fabricación.

Cuando se intenta maximizar la eficiencia de un motor, debe considerarse que ésta pueda incrementarse por dos métodos diferentes. Una posibilidad es seguir el camino en el cual la mejoría se logra fundamentalmente a base de adicionar materiales y empleando tecnologías más costosas. La otra posibilidad es optimizar el diseño del motor utilizando métodos de optimización. La diferencia entre los dos enfoques es que en el primer caso la mejoría se alcanza modificando un diseño existente, mientras que en el segundo caso se obtienen diseños totalmente nuevos.

En la primera variante, el incremento de los materiales implica fundamentalmente aumentar el volumen del material activo (acero magnético y material conductor de la corriente) y las mejoras tecnológicas significan emplear aceros magnéticos de mejor calidad, utilizar un mayor factor de llenado en las ranuras, incrementar el número de ranuras del estator y del rotor, etc.

Las características de diseño de la mayoría de los motores de alta eficiencia son:

- Las pérdidas en los conductores del estator disminuyen aumentando el área disponible para los conductores mediante la colocación en las ranuras de conductores de más sección o a través de un incremento de las dimensiones de las ranuras. Una variación en la configuración del devanado puede conducir también a una reducción de estas pérdidas, si se logra disminuir con ello la longitud de las cabezas de bobina y por lo tanto la resistencia del bobinado estatístico.
- Las pérdidas en los conductores del rotor pueden reducirse incrementando la cantidad del material conductor (en las barras y en los anillos), utilizando materiales de mayor conductividad, así como aumentando el flujo total que atraviesa el entrehierro. La magnitud de estos cambios esta limitada por las siguientes restricciones: momento mínimo de arranque requerido, corriente máxima de arranque permisible y el factor de potencia mínimo aceptable.
- Las pérdidas en el núcleo magnético se reducen haciendo que el motor opere con inducciones mas bajas que las normales y para compensar se incrementando la longitud de la estructura ferromagnética. Esto reduce las pérdidas por unidad de peso, pero debido a que el peso total aumenta, la mejoría en cuanto a pérdidas no es proporcional a la reducción unitaria de estas. La disminución en la carga magnética también reduce la corriente de magnetización; y esto influye positivamente en el factor de potencia.

- Las pérdidas por fricción y ventilación están asociadas a los ventiladores y a la cantidad de ventilación requerida para extraer el calor generado por otras pérdidas en el motor, tal como las pérdidas en el cobre, las del núcleo y las adicionales. Según se reducen las pérdidas que generan calor, es posible reducir el volumen de aire requerido para moverlas y de esta manera, se pueden reducir las pérdidas por ventilación. Esto resulta valido especialmente en el caso de motores cerrados con ventilación externa forzada. Otro camino es el logro de un mejor diseño aerodinámico. Uno de los subproductos importantes de la reducción de las pérdidas de ventilación, es la disminución de los niveles de ruido.
- Las pérdidas adicionales se pueden reducir mediante un diseño optimizado del motor y mediante un proceso cuidadoso de producción. Como estas pérdidas están asociadas al procesamiento, tal como las condiciones superficiales del rotor, se pueden minimizar a través de un control cuidadoso del proceso de fabricación. Las pérdidas adicionales son las más difíciles de controlar en el motor, debido al gran numero de variables que contribuyen a las mismas.

5. MOTORES DE ALTA EFICIENCIA

Aunque no existe una definición unificada mundialmente sobre lo que es un motor de alta eficiencia, una revisión histórica de su desarrollo nos permite tener una noción mas clara de este concepto.

5.1 Desarrollo de los Motores de Alta Eficiencia

Hasta el año 1960 los diseñadores y fabricantes de motores de inducción siguieron la tendencia de diseñar los motores con el objetivo de conseguir una alta eficiencia, a pesar de que en ese entonces los materiales no tenían un gran desarrollo el diseño electromagnético centrado en la eficiencia consiguió que se fabriquen motores de eficiencias aceptables.

El bajo costo de la energía eléctrica en aquella época hacia que la eficiencia no fuera un parámetro que incidiera en los costos de operación. Por eso durante el periodo de 1960 hasta 1975 los fabricantes cambiaron su tendencia y se centraron a diseñar motores para conseguir un costo mínimo, sobre todo en el rango de 1 a 250 HP. Con este objetivo se disminuyo la cantidad de material activo, y los materiales fueron seleccionados para cumplir

mínimos requerimientos de eficiencia. En este contexto en 1977 NEMA recomendó marcar la placa de los motores trifásicos con una EFICIENCIA NOMINAL NEMA. La Tabla 4 muestra los rangos de eficiencia para motores trifásicos de Diseño NEMA B, aquí se define un valor mínimo para la eficiencia para cada nivel de eficiencia.

Tabla 4. Eficiencia nominal para motores trifásicos diseño NEMA B

HP	Rango de Eficiencia Nominal	Eficiencia Nominal Promedio
5	78 – 85	82
10	81 – 88	85
25	85 – 90	88
50	88 – 92	90
75	89.5 – 92.5	91
100	90 – 93	91.5
150	91 – 93.5	92.5
200	91.5 – 94	93
250	91.5 – 94.5	93.5

La crisis energética que ocurrió en la década del 70 hizo que los costos de la energía eléctrica empiecen a incrementarse a un ritmo de aproximadamente 12% anual. En este contexto los costos de operación de un motor por consumo de energía hicieron que la eficiencia sea un parámetro importante en la selección del motor. En este contexto en el año 1974 algunos fabricantes empezaron a usar métodos para diseñar motores con una eficiencia mayor que la exigida por la Norma NEMA. Así se diseño una línea de motores de alta eficiencia con perdidas 25% menores que el motor promedio diseño NEMA B, esto se llamo la primera generación de motores de alta eficiencia.

Luego del desarrollo de esta primera generación de motores de alta eficiencia, muchos fabricantes entraron en la tendencia de diseñar motores con el objeto de obtener una alta eficiencia, usando un diseño, materiales y procesos de fabricación mejorados. Cada fabricante identifico a su motor con un nombre, entre ellos tenemos:

Fabricante	Nombre del motor
General Electric	Energy Saver
Realince Electric Co	XE Energy Effiicient
Baldor Electric Co	Super E
Magnetek/Louis Allis	Spartan High Efficiency
US Electrical Motors	Corro- DutyPremium Efficiency
Siemens	Premium Efficiency
Toshiba	Premium Efficiency

En 1992 en USA se expidió el documento Energy Policy Act of 1992 (EPACT'92). En cuanto a los motores el EPACT cubre motores de inducción de jaula de ardilla de 1 a 200 HP, de 2,4 y 6 polos y de propósito general diseños nema A y B. Las eficiencias mínimas exigidas por el EPACT esta escritas en la Tabla 12-10 de la Norma NEMA MG1.1997. La Tabla 5 muestra las eficiencias para algunas potencias extraídas de la Tabla 12-10.

Tabla 5. Eficiencia nominal mínima de motores trifásicos de inducción de alta eficiencia TEFC de acuerdo al EPACT

HP	6 polos	4 polos	2 polos
5	87.5	87.5	87.5
10	89.5	89.5	89.5
25	91.7	92.4	91
50	93	93	92.4
75	93.6	94.1	93
100	94.1	94.5	93.6
150	95	95	94.5
200	95	95	95

5.2 Normas sobre Motores de Alta eficiencia

En varios países se han dado legislaciones para obligar el uso de motores de alta eficiencia, entre estos mencionaremos a algunos.

- USA. En 1992 se dio la EPACT'92, esta ley determinó que ha partir del 24 de Octubre de 1997 todos los motores de uso general que se instalen en USA deben de tener una eficiencia que cumpla la tabla 12-10 de la Norma NEMA MG1.1997. Esto incluye motores de una sola velocidad, de 2,4 y 6 polos, diseño NEMA A y B, cerrados (TEFC) o abiertos (ODP), de 1 a 200 HP.
- CANADÁ. En 1992 en Canadá se dio la legislación llamada Energy Efficient Act y fue acatada a partir de Diciembre de 1997. Los valores de eficiencia y características de los motores son los mismos que el EPACT'92.
- MÉXICO. En Mayo de 1998 expidió la Norma Oficial Mexicana NOM-016-ENER-1997 EFICIENCIA ENERGÉTICA DE MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA, la cual da los límites de eficiencia, los métodos de prueba y marcado para motores de inducción tipo Jaula de ardilla de uso general entre 1 y 200 HP. Esta Norma entro en cumplimiento en junio de 1998.

6. GUÍA DE SELECCIÓN DE MOTORES DE ALTA EFICIENCIA

6.1 Decisión inicial de compra.

Cuando se considera la posibilidad de compra de un nuevo motor eléctrico, el ingeniero responsable de la decisión debe valorar la rentabilidad económica de pagar un costo adicional por el motor de alta eficiencia frente al ahorro derivado de un menor consumo energético. Un aspecto principal en esta decisión es el tiempo de amortización de la inversión. Normalmente estas iniciativas de ahorro industrial consideran dos o tres años el periodo de tiempo necesario para reintegrar el dinero invertido. Para el especialista el criterio de operación que determina la idoneidad de una u otra elección es el número de horas de trabajo del motor. Los motores escasamente utilizados (por ejemplo, motores de accionamiento de válvulas de control) por baja potencia requerida y/o pocas horas de trabajo no serán candidatos a elegir para ser motores de alta eficiencia. Sin embargo, los que operen de tal forma que determinen un consumo energético elevado serán una buena oportunidad de instalar un motor de alta eficiencia.

Considerando valores medios de carga del motor (75%), de mejora de eficiencia entre el motor estándar y el motor de alta eficiencia (entre el 2% al 5%), de costo de compra del motor, de periodo de amortización de tres años y del precio de la energía, puede indicarse que es interesante la compra de un motor de alta eficiencia en los siguientes casos:

- En los motores entre 10HP y 75HP cuando operan 2500 horas anuales o más.
- En los motores de potencias distintas a las anteriores (pequeños y grandes motores) cuando operan 4500 horas o más.

6.2 ¿Reparar o reemplazar?

Cuando un motor falla se presentan tres alternativas: reparar el motor averiado, comprar un nuevo motor de eficiencia estándar o comprar un nuevo motor de alta eficiencia.

La alternativa de reparación parece ser, a primera vista, la más oportuna por cuanto su costo es inferior a una nueva compra, sin embargo, está constatado que en la mayoría de las ocasiones el rebobinado de un motor conduce a una pérdida de rendimiento, en algunos casos importante, y adicionalmente una menor fiabilidad de funcionamiento, en cuanto que se disipa mayor calor y el motor soportará mayores exigencias. Todas estas variaciones en las

pérdidas de potencia del motor son debidas a los calentamientos necesarios para retirar el bobinado dañado y a errores o modificaciones de dimensionamiento del tamaño del calibre del conductor y de topología del devanado. Estudios de General Electric sobre motores de 3 a 150 HP han determinado que las pérdidas se incrementan un 18%, es decir, que la eficiencia empeora entre 1,5% y 2,5%.

La decisión de sustituir el motor averiado por un motor de alta eficiencia es compleja porque depende de varias variables, como el costo de reparación, la variación del rendimiento, el precio del nuevo motor, la eficiencia original del motor instalado, el factor de carga, las horas de operación anuales, el precio de la energía y el criterio de amortización. No obstante, indicaremos algunas claves en esta elección:

- Relacionarse con talleres de reparación calificados para la obtención de información fiable.
- Los motores menores de 40HP y más de 15 años de utilización, o también los motores menores de 15HP, son candidatos a ser reemplazados.
- Si el costo de rebobinado supera el 50% del costo de un motor nuevo, se deberá sustituir por uno nuevo.

6.3 Motores poco cargados o sobrecargados

Los motores industriales no suelen funcionar a plena carga, pruebas de campo de la California Energy Commission llevadas a cabo en cuatro plantas industriales nos indican que por término medio los motores eléctricos operan al 60% de su carga asignada. Es común que las industrias instalen motores de mayor potencia a la requerida por varias razones prácticas:

- Prevención indirecta de fallos en procesos críticos.
- Desconocimiento de la carga real del motor en la elección de éste.
- Previsión de futuras ampliaciones productivas.
- Por reducciones posteriores de producción.
- Por sustitución de un motor previamente fallido que era de menor potencia.

En cuanto a los motores poco cargados, debe advertirse que no siempre su eficiencia es menor, excepto cuando la carga sea acentuadamente

pequeña (menor del 25%) Por ello, cuando la carga supera el 50% no se pueden dar recomendaciones simples de sustitución de éstos motores. En todo caso su factor de potencia es menor y esto afecta a las pérdidas en la distribución eléctrica

Los costos extra indeseables de estos motores son: mayor costo de adquisición del motor y su equipamiento y mayor costo de consumo energético por la reducción de la eficiencia del motor y el sistema eléctrico (factor de potencia) En muchas ocasiones resulta económicamente interesante sustituir un motor poco cargado por un motor de alta eficiencia o incluso por un motor de eficiencia normal.

7. VENTAJAS, LIMITACIONES Y APLICABILIDAD DE LOS MOTORES DE ALTA EFICIENCIA

7.1 Ventajas

- El hecho de que se tenga una eficiencia mayor significa que se disminuye los costos de operación del motor y se puede recuperar la inversión adicional en un tiempo razonable, sobre todo si se opera a una carga cercana a la potencia nominal. Recuerde que en un año el costo de la energía es aproximadamente seis veces el costo de compra del motor.
- Los motores de alta eficiencia poseen generalmente un menor deslizamiento (mayor velocidad de operación) que los motores de eficiencia estándar, debido a los cambios que se producen en los parámetros del motor. La mayor velocidad puede ser ventajosa en muchos casos, pues mejora la ventilación.
- Los motores de alta eficiencia son normalmente más robustos y mejor contruidos que los motores estándar, lo que traduce en menores gastos en mantenimiento y mayor tiempo de vida.

7.2 Limitaciones

- El hecho de que los motores de alta eficiencia operan a una velocidad mayor, puede ocasionar un incremento en la carga, sobre todo cuando se accionan ventiladores o bombas centrífugas, este hecho debe valorarse en cada situación .
- El momento de arranque y el momento máximo son en algunos diseños ligeramente mayores y en otros ligeramente menores, por lo tanto es necesario analizar detalladamente en cada aplicación.

- La corriente de arranque suele ser mayor. Esto puede provocar que se sobrepasen los límites máximos de caída de voltaje en la red. También puede influir en la capacidad de los equipos de maniobra, aunque muchas veces se puede operar con los mismos que se usan con los motores estándar y en ocasiones sólo resulta necesario cambiar los elementos térmicos.
- La corriente transitoria en el arranque, que tiene su máximo en el primer medio ciclo, se incrementa debido a la tendencia a un mayor valor de la relación X/R. Aunque esta corriente puede no afectar el tamaño del arrancador, si se afecta el disparo instantáneo del interruptor del motor, por lo que hay que buscar un compromiso entre la coordinación del interruptor y los disparos del arranque.
- El factor de potencia del motor puede ser menor que un motor estándar. Un estudio reciente realizado por Bonnett (1997) encontró que los motores de alta eficiencia construidos en USA, en el intervalo de 3 a 10 HP tienen un factor de potencia mayor que los estándares, inferior en el intervalo de 15 a 40 HP, aproximadamente igual de 50 a 100 HP y de nuevo menor de 125 HP en adelante.

7.3 Aplicabilidad.

Los motores de alta eficiencia pueden aplicarse favorablemente en los siguientes casos:

- Cuando el motor opera a una carga constante y muy cerca del punto de operación nominal.
- Cuando se usan para reemplazar a motores sobredimensionados.
- Cuando se aplican conjuntamente con Variadores electrónicos de frecuencia (Variable Frequency Drives) para accionar bombas y ventiladores, pueden lograr ahorros de hasta mas del 50% de la energía.
- Como parte de un Programa de Uso eficiente de la Energía Eléctrica.
- En instalaciones nuevas.

El ahorro de dinero al aplicar un motor de alta eficiencia se puede calcular usando la siguiente ecuación:

$$S = 0.746 \text{ HP } L C T \left(\frac{100}{E_A} - \frac{100}{E_B} \right)$$

S : Ahorro en pesos por año

HP : Potencia de placa en HP

L : Porcentaje de carga del motor respecto a la potencia nominal.

C : Costo de la Energía en pesos por KWh

T : Tiempo de funcionamiento del motor en horas por año.

EA : Eficiencia del motor estándar

EB : Eficiencia del motor de alta eficiencia.

8. CONCLUSIONES

Este artículo presenta un esbozo histórico del desarrollo de los motores de alta eficiencia, además presenta un enfoque conceptual de las características físicas que lo distinguen de motores estándar, a la luz de lo cual podemos enunciar que los motores de alta eficiencia son motores de construcción especial que cumplen con eficiencias mínimas dadas en la legislación cada país como el EPACT92 en USA.

Si bien es cierto que los motores eléctricos de alta eficiencia son una alternativa importante para el uso eficiente de la energía eléctrica, su aplicación indiscriminada puede ocasionar la presencia de problemas de arranque o de sobre costo innecesarios. Por lo que es importante conocer sus características electromecánicas, ventajas, limitaciones, para analizar la pertinencia de su aplicación en cada caso.

El desconocimiento de las características electromecánicas de los motores de alta eficiencia ha llevado a que los ingenieros y técnicos se formen conceptos errados sobre este tipo de motores, estos conceptos son desmitificados en el Anexo de este artículo.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andreas John C. ENERGY-EFFICIENT ELECTRIC MOTORS. Second Edition. Copyright Marcel Dekker, Inc. New York, USA 1992.

Bonnett Austin QUALITY AND RELIABILITY OF ENERGY-EFFICIENT MOTORS. IEEE Industry Applications Magazine. January/February. USA. 1997

Electrical Apparatus Service Association, Inc. UNDERSTANDING ENERGY EFFICIENT MOTORS. Copyright Electrical Apparatus Service Association, Inc. St. Louis. MO. USA. 1999.

NEMA Standars Publication MG 1.1997 MOTORS AND GENERATORS. National

Electrical Manufacturers Association, Washinton DC, USA. 1997

Percy Viego y Enrique Quispe APLICACIÓN EFICIENTE DE MOTORES ASINCRÓNICOS. LIBRO. Editor: Contactos Mundiales. Cali - Colombia. 2000.

Quispe Enrique. MÉTODOS PARA EL AHORRO DE ENERGÍA EN EL USO DE MOTORES ELÉCTRICOS. Memorias de las JORNADAS INTERNACIONALES DE ENERGÍA, IEEE, ACIEM , Octubre, 2001, Bogotá - Colombia.

Quispe Enrique. MOTORES DE ALTA EFICIENCIA: Características, Limitaciones , Aplicabilidad. Memorias del SEMINARIO INTERNACIONAL EN CALIDAD Y USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA ELECTRICA, CUAO, Junio 2002 Cali – Colombia. ■

del País Vasco. Doctor Ingeniero Industrial de la Universidad de Cantabria. Actualmente es Profesor Titular de Universidad del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética de la Universidad de Cantabria. España en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. Ha participado en trabajos de investigación, habiendo publicado varios artículos en Revistas Técnicas y Científicas Nacionales e Internacionales. Ha participado en numerosos Congresos Nacionales e Internacionales. Sus líneas de investigación actuales son: Máquinas Eléctricas, Mejora de la Eficiencia Energética en Sistemas Industriales de Accionamiento basados en motores eléctricos.

mantillf@unican.es

AUTORES



Enrique C. Quispe O.

Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Ingeniería. Lima – Perú. Magister en Ingeniería Eléctrica y Especialista en Automatización Industrial ambas en la Universidad del Valle. Cali - Colombia. Actualmente es Profesor Asistente del Departamento

de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Corporación Universitaria Autónoma de Occidente CUAO, Cali – Colombia y Director del Grupo de Investigación en Energías de esta Universidad. Miembro del IEEE Industry Applications Society y Presidente del Comité Nacional de Máquinas Eléctricas Rotativas del Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC. Ha escrito 27 artículos y ha participado en numerosos Congresos Nacionales e Internacionales. Su área de interés son la Teoría Electromagnética, las Máquinas Eléctricas, el Uso Eficiente y la Calidad de la Energía Eléctrica.

ecquispe@ieee.org



Luis Fernando Mantilla

Peñalba. Ingeniero Técnico Industrial de la Universidad de Cantabria. Ingeniero Industrial de la Universidad