

BUENAS PRÁCTICAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA Motores Eléctricos Industriales



Introducción

Los motores eléctricos son los equipos de mayor consumo de energía eléctrica en las instalaciones industriales. Aproximadamente entre el 60 % y el 70 % del consumo de energía eléctrica corresponde a equipos electromotrices (equipos auxiliares) tales como ventiladores, bombas, compresores de aire, bandas transportadoras, entre otros y que a su vez están acoplados a motores eléctricos.

Dada su importancia, es evidente el gran impacto que tienen los motores en el consumo de energía eléctrica en el sector industrial, por lo tanto, resulta conveniente identificar y evaluar oportunidades de ahorro de energía en estos equipos. Para tal efecto, es necesario conocer las condiciones actuales de operación de los motores en cuanto a su alimentación eléctrica (voltaje, corriente, factor de carga, eficiencia, factor de potencia, etc.). También las condiciones de operación (sobredimensionamiento, alineamiento del eje, condiciones ambientales, acoplamientos, entre otros). Además es relevante indagar sobre la antigüedad de los equipos, el número y tipo de reparaciones que han experimentado. Para lograr la eficiencia energética es necesario considerar todos estos factores, además de investigar las tecnologías más eficientes: motores de alta eficiencia, equipos auxiliares como los convertidores de frecuencia y controladores de operación, entre otros.



Fundamentos Teóricos

El motor eléctrico es un dispositivo que transforma la energía eléctrica en energía mecánica por medio de la acción de los campos magnéticos generados en sus bobinas. Son máquinas eléctricas rotatorias compuestas por un estator y un rotor.

Algunos de los motores eléctricos son reversibles, ya que pueden transformar energía mecánica en energía eléctrica funcionando como generadores. Los motores eléctricos tienen por misión convertir la energía eléctrica en energía mecánica apta para mover los accionamientos de todo tipo de máquinas, los motores constan básicamente de dos partes claramente diferenciadas.

1. Estator fijo

Constituye la parte fija del motor. El estator es el elemento que opera como base, permitiendo que desde ese punto se lleve a cabo la rotación del motor. El estator no se mueve mecánicamente, pero sí magnéticamente. Está compuesto por chapas magnéticas agrupadas.

2. Rotor móvil

Constituye la parte móvil del motor. El rotor es el elemento de transferencia mecánica, ya que de él depende la conversión de energía eléctrica a mecánica. Los rotores, son un conjunto de láminas de acero al silicio que forman un paquete. Se apoya en cojinetes de rozamiento, normalmente está constituido por chapas agrupadas con ranuras en las que se colocan los devanados. El espacio comprendido entre el rotor y estator es constante y se denomina entrehierro.

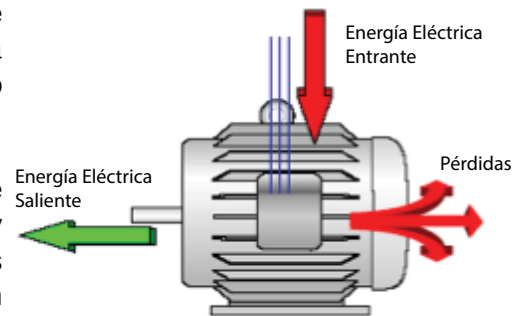
Motores asíncronos o de inducción

Los motores asíncronos o de inducción son los más utilizados en la industria. Son un tipo de motor de corriente alterna en el que la corriente eléctrica, en el rotor, necesaria para producir torsión es inducida por inducción electromagnética del campo magnético de la bobina del estator. El motor asíncrono trifásico está formado por un rotor, que puede ser de dos tipos: a) de jaula de ardilla y b) bobinado, y un estator, en el que se encuentran las bobinas inductoras. . Estas bobinas son trifásicas y están desfasadas entre sí 120° en el espacio, cuando por estas bobinas circula un sistema de corrientes trifásicas equilibradas, cuyo desfase en el tiempo es también de 120° , se induce un campo magnético giratorio que envuelve al rotor. Este campo magnético variable va a inducir una tensión en el rotor.

Perdidas de energía

En la transformación de energía eléctrica en mecánica, que tiene lugar en los motores eléctricos una parte de la energía eléctrica tomada de la red se convierte en calor, constituyendo las pérdidas del motor, ver figura.

Las pérdidas de un motor de inducción, pueden desglosarse en 5 principales áreas, cada una de estas depende del diseño y construcción del motor. Estas pérdidas se clasifican en aquellas que ocurren cuando el motor está energizado y permanecen para un voltaje y velocidad dado, y las que varían e incrementan con la carga del motor.



1. Pérdidas en el núcleo

Representan la energía requerida para magnetizar el material del núcleo (histéresis) e incluyen las pérdidas por la creación de las corrientes de Eddy que fluyen en el núcleo. Las pérdidas en el núcleo pueden disminuir al mejorar la permeabilidad electromagnética del acero y extendiendo o alargando el núcleo para reducir la densidad del flujo magnético. Las pérdidas de las corrientes de Eddy son reducidas utilizando laminaciones de acero más delgadas (representa el 19% de las pérdidas).

2. Pérdidas de fricción y ventilación

Estas pérdidas ocurren debido a la fricción, se deben al rozamiento de los rodamientos del eje del motor. Las pérdidas de ventilación que se deben a la fricción de las partes en movimiento del motor con el aire que se encuentra dentro de la carcasa. Mejorando la selección de cojinetes, flujo de aire y el diseño del ventilador se pueden ver reducidas. En un motor de alta eficiencia la minimización de pérdidas resulta en menores necesidades de enfriamiento, así que se utiliza un ventilador más pequeño, tanto las pérdidas en el núcleo como las pérdidas de fricción son independientes de la carga del motor (representa el 13% de las pérdidas).

3. Pérdidas en el estator

Estas pérdidas se reflejan como calentamiento debido al flujo de corriente a través del embobinado del estator y dependen de la resistencia eléctrica del material utilizado. Estas se determinan como función de I^2R , donde I es la corriente que circula por una fase de la armadura, y R es la resistencia de una de las fases. Pueden ser reducidas modificando el diseño de la armadura del estator o disminuyendo el espesor del aislamiento para incrementar el volumen de cable en el estator (pueden alcanzar hasta el 30% de pérdidas).

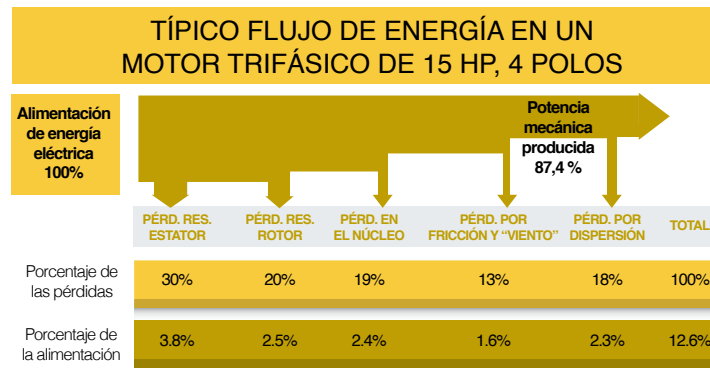
4. Pérdidas en el rotor

Son función de I^2R y afectan el calentamiento del rotor. Pueden disminuirse incrementando el tamaño de las barras conductoras para bajar la resistencia, o reduciendo la corriente eléctrica (pueden alcanzar hasta el 20% de las pérdidas).

5. Pérdidas adicionales

Son pérdidas que no se pueden incluir dentro de ninguna de las anteriores, dependen a su vez del tipo de fabricación y método de diseño del motor. Las pérdidas en el estator, rotor y adicionales son función de la carga del motor. (representan hasta un 18% de las pérdidas totales).

En el esquema se presenta un resumen de las pérdidas mencionadas anteriormente.

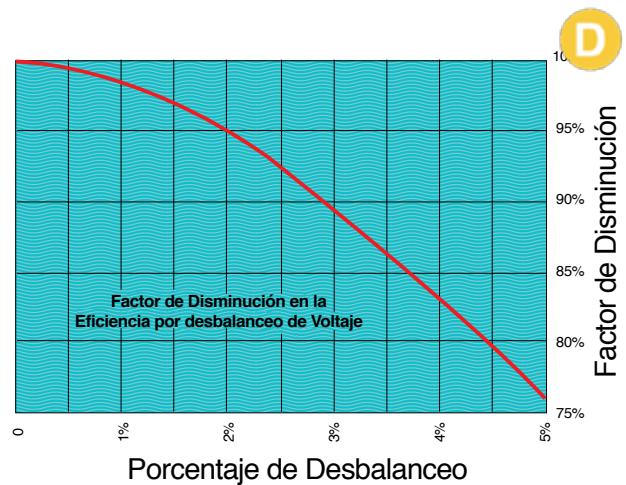
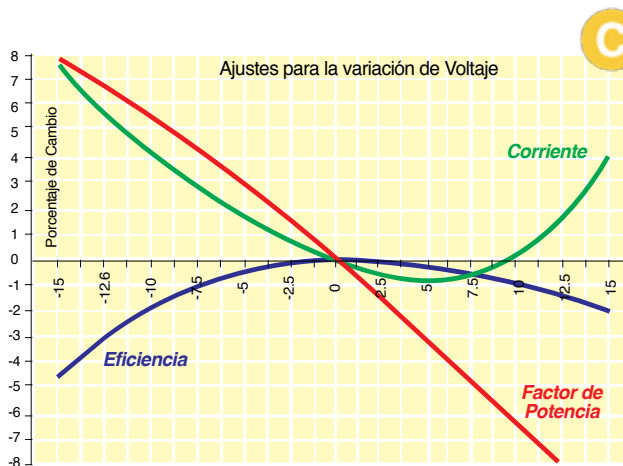
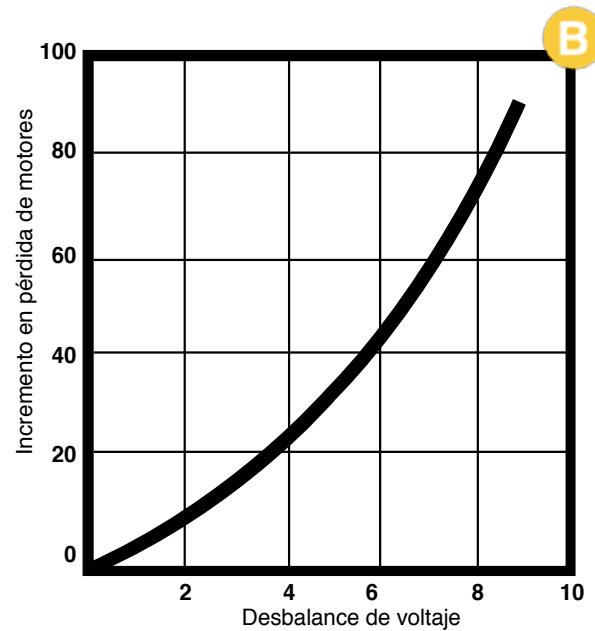
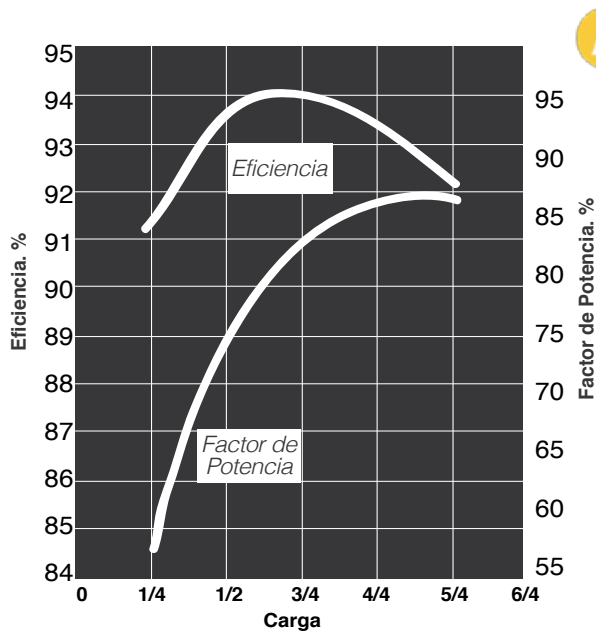


Fuente: Guía práctica BALDOR. Edward H. Cowern



Efecto de carga, variación y desbalance de voltaje en la operación del motor

En las gráficas siguientes se puede apreciar el comportamiento de algunas variables de operación de los motores de inducción. Específicamente se muestra cómo afecta a la operación del motor el nivel de carga, la variación del voltaje de suministro y el desbalance de voltaje. Por ejemplo en la gráfica A vemos como la mayor eficiencia y factor de potencia se logra cuando el motor opera a un 75% de su carga, más allá de esta razón de carga ambas variables se reducen. Al igual en la gráfica B un desbalance en el voltaje de alimentación incrementa exponencialmente las pérdidas de motor, por ejemplo un desbalance de un 9% incrementa las pérdidas en un 90%. Por otro lado en la gráfica D con un desbalance de voltaje de un 5% se reduce la eficiencia en cerca de un 76% como se puede apreciar en la gráfica respectiva.



Mecanismos de control para la operación de motores

Es importante verificar los actuales sistemas de control y protección de los motores. Para esto, existen dos acciones fundamentales:

Primera : Mejoras en el sistema de control en motores que accionan cargas variables (bombas, ventiladores): Con el uso de los variadores de frecuencia, tenemos una reducción controlada de la potencia de los motores variando su velocidad. Esto trae como consecuencia un importante ahorro de energía eléctrica que, dependiendo del ciclo de trabajo, puede ser de:

- Bombas centrífugas 20 a 50%
- Bombas alternativas 10 a 30%
- Ventiladores/extractores 20 a 50%
- Correas transportadoras 10 a 30%

Segunda : Uso de arrancadores suaves: Especialmente en aplicaciones donde es necesaria la repetición de arranque del motor. Cada vez que el motor es arrancado, éste consume hasta siete veces la corriente nominal del motor. Con el uso del arrancador suave, es posible hacer operar el motor con la corriente mínima evitando altas demandas máximas en la facturación, fluctuaciones bruscas en la red eléctrica y problemas mecánicos ocasionados por el alto torque de arranque del motor.

Motores de alta eficiencia

La gran diferencia de un motor de eficiencia estándar a uno de alta eficiencia es:

- En el ventilador: Diseño aerodinámico, bajas pérdidas de fricción y es ligero.
- Utilización de Acero de Silicio: Reduce corrientes de Eddy, reduce las pérdidas del campo magnético.
- Entre hierro más estrecho: Reduce las pérdidas magnéticas y por fricción al aire con el rotor.
- Más cobre: Más y mejor cobre para reducir la resistencia a la corriente y reducir pérdidas por flujo de corriente.
- Mayor área de laminación: Con esto se reduce la dispersión de campo magnético.
- Armazón de hierro fundido: Es resistente a la corrosión, excelente disipación, acabado preciso para mejorar la transferencia de calor.
- Embobinados de cobre de alta eficiencia: Resistentes a la humedad, hasta 200°C, aislamiento entre fases, correcto atado de cabezas para eliminar cualquier vibración.
- Baleros (roles) anti-fricción: Bajo calentamiento, bajo ruido, pocas pérdidas por fricción.

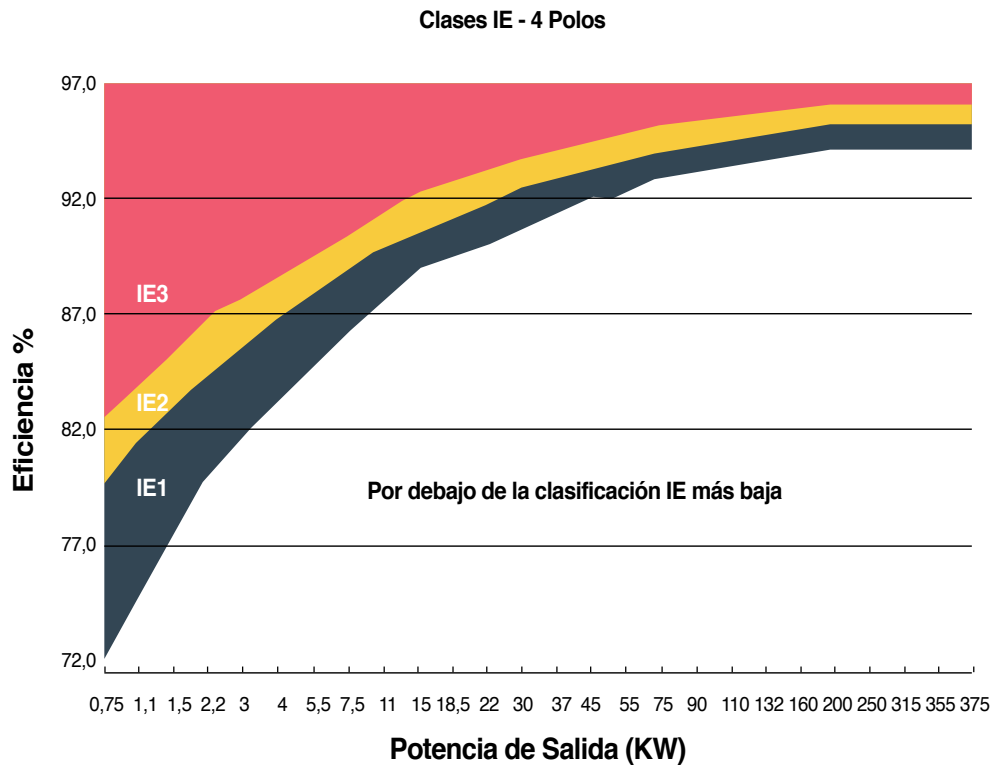
La buena noticia es que los motores de alta eficiencia, por su especializado diseño, reducen los costos de operación a cualquier nivel de carga, incluso al funcionar sin carga.

Normas de motores alta eficiencia

La norma IEC 60034-30 define las nuevas clases de eficiencia para 50 y 60 Hz y estipula, en todo el mundo, qué motores están contemplados y qué excepciones se aplican. La directiva EuP se basa esencialmente en puntos de esta norma. En la norma IEC60034-30 se han definido nuevas clases de eficiencia (o rendimiento) para los motores de inducción (IE=International efficiency)

- IE1 : eficiencia estándar (equiparable a eff2)
- IE 2 : alta eficiencia (equiparable a eff1 o EPAct'92)
- IE 3 : eficiencia premium (equiparable a EPAct'05)

En la gráfica siguiente se puede apreciar de manera gráfica la comparación de las eficiencias según entre estas normas.



Buenas Prácticas

Las oportunidades de ahorro energético deben estar orientadas directamente a solucionar las causas que provocan un alto consumo, producto de la pérdida de eficiencia del equipo por obsolescencia tecnológica o los malos hábitos en el uso de los equipos, dichas causas pueden ser de diseño e instalación de los equipos o bien en la operación del mismo.

- Realizar un análisis del sistema actual teniendo en consideración la necesidad real de torque y velocidad (RPM) del equipo a acoplar al motor, en palabras más sencillas determinar si el motor está sobredimensionado.
- Valorar siempre instalación de motores de alta eficiencia, tomando en consideración que el costo inicial del mismo únicamente representa un 2% del costo total del motor al final de su vida útil.
- Analizar la operación de equipo con el fin de determinar si la carga requerida al motor es variable, de ser así cabe la posibilidad de instalar un variador de frecuencia con el fin de reducir su consumo.
- Para mantener una operación óptima del motor hay que tener en consideración:
 - La variación de voltaje y frecuencia no debe ser superior a un $\pm 10\%$ a no ser que el motor esté diseñado para tales condiciones.
 - Limpiar, cepillar, aspirar la suciedad acumulada desde el armazón y los pasajes de aire del motor. Los motores con gran suciedad pueden sobrecalentarse al no tener una ventilación adecuada. El calor reduce la vida del aislamiento y eventualmente el motor puede fallar.
 - Lubricar el cojinete cuando esté programado o cuando haya ruido o un sobrecalentamiento. Nunca se debe sobre lubricar. Excesiva grasa y aceite puede dañar los cojinetes. Se recomienda lubricar cada 2.000 horas de operación o al menos una vez al año.
 - Especial atención a un exceso de calor, vibración o ruido anormal en la carcasa del motor o cojinetes. Todo indica una posible falla en el equipo. Se debe de identificar inmediatamente y eliminar la fuente de calor, ruido o vibración.
 - Un calor excesivo es una de las causas de que el motor tiene una falla y una señal de problemas. El daño primario es causado por exceso de calor lo cual reduce vida útil del aislamiento.
 - El calor del motor se puede ver incrementado por fricción excesiva causada por desalineamiento, cojinetes en mal, tensión en el sistema transmisión o el incremento en el torque del motor por variaciones de la carga.
 - Especial atención al devanado y aislamiento: para que el motor tenga una larga vida útil, se requiere envolver y proteger el devanado de suciedad excesiva, humedad, aceites y químicos. Para esto se debe tener presente las siguientes recomendaciones:
 - Se debe aspirar el devanado y los pasajes internos de aire. Nunca utilice alta presión de aire debido a que puede dañar el devanado, puede ocasionar que la suciedad entre en el aislamiento.
 - Si el interior del motor está húmedo, se debe secar el motor de acuerdo con lo especificado por el fabricante.
 - Limpiar cualquier aceite o grasa que esté dentro del motor
 - Si el devanado aparenta estar quebradizo, sobrecalentado, o rasgado, el motor debe de ser re-barnizado o en condiciones severas rebobinado.

- Generalmente cuando un motor falla se tiene la posibilidad de:
 - 1) Rebobinar
 - 2) Reemplazar por un motor nuevo estándar
 - 3) Invertir en un motor de alta eficiencia.

Las diferencias entre invertir para rebobinar e invertir para la compra de un motor de alta eficiencia se aprecia en la siguiente tabla donde se hace la comparación de cual opción es más rentable, el rebobinado o bien adquirir un motor de alta eficiencia.

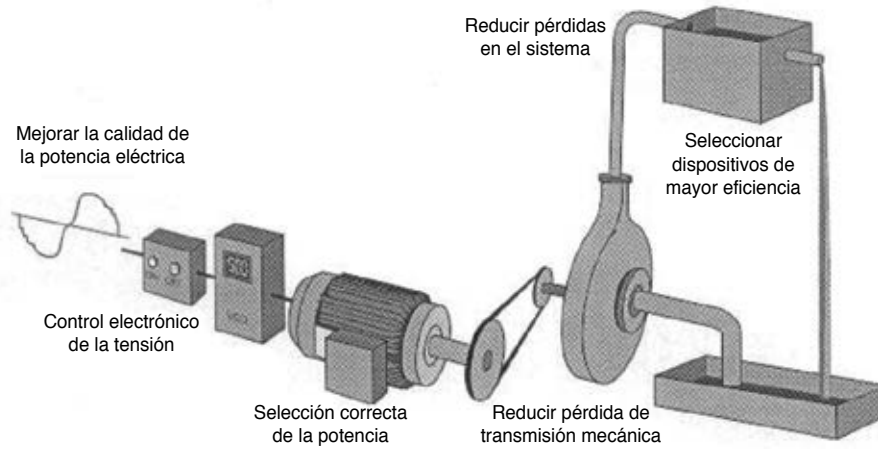
Hp	Alta Calidad de Rebobinado			Premium-Efficiency Motor
	Pobre calidad de rebobinado	½ Tamaño cable	Full tamaño cable	
10	-6,0	+0,6	+1,1	+4,2
50	-3,7	+0,5	+0,8	+2,8
100	-2,1	+0,4	+0,7	+4,5
200	-1,9	+0,3	+0,6	+2,1

“Ganancias en eficiencias (perdidas): Rebobinado contra Motor Premium”,
Impacto en la eficiencia del motor por el rebobinado.
Jim Custodio. GE motors”

A la hora de realizar sustituciones de equipos motrices también hay que tomar en consideración que:

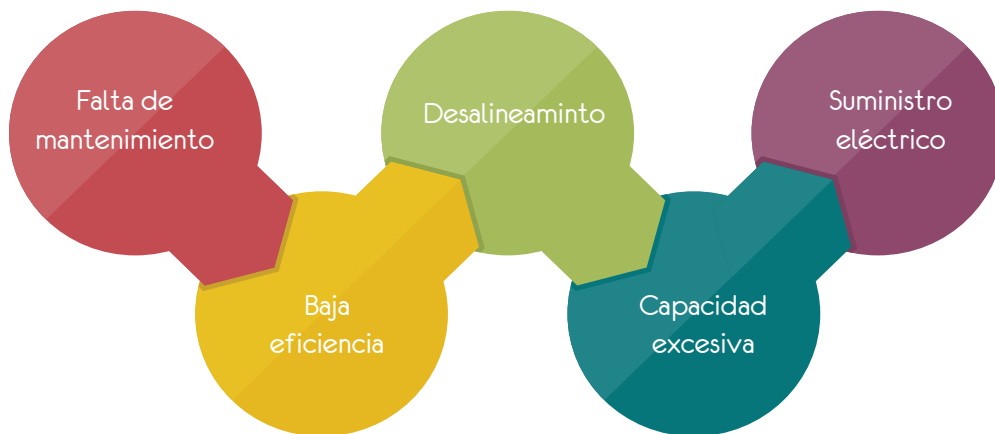
- Motores menores de 100 HP y de más de 10 años de vida (especialmente aquellos que han sido rebobinados previamente) tendrán eficiencias significativamente menores que los motores actuales. En este caso es mejor reemplazarlos.
- Si el costo del rebobinado excede el 35% del precio de un motor de alta eficiencia, entonces es mejor comprar un motor nuevo eficiente.
- Si el costo de la energía eléctrica promedio es un valor considerable (\$/kWh) y además el motor trabaja como mínimo 4,000 horas al año, la sustitución por un motor de alta eficiencia puede ser muy rentable.
- El motor ya haya sido rebobinado más de una ocasión.
- Un motor acoplado por medio de fajas lisas consumen un 7% de energía de más, fajas dentadas un 5% más y con Cadenas 3% más de energía, por lo que se recomienda acoplarlos directamente.

En resumen las oportunidades de ahorro energético en sistemas de accionamiento se pueden apreciar en la figura siguiente. Por eso debemos ver el sistema completo e integral y no solamente el motor como único elemento. La eficiencia global del sistema es la suma de las eficiencias de cada componte, dentro de los cuales el motor eléctrico es sin duda alguna uno de los más importantes.



Fuente: Universidad Autónoma de Occidente, Barranquilla, Colombia.

Causas de pérdida de Eficiencia Energética



Casos prácticos

Sobre motores eléctricos

1. ¿Cuál es el deslizamiento, factor de carga y eficiencia de un motor de 40 Hp, con una velocidad de placa de 3.570 RPM, el cual registró una potencia trifásica de 34 kW?. Se midió la velocidad del rotor con un tacómetro y fue de 3.580 RPM. Se tiene una velocidad síncrona de 3.600 RPM. El motor opera 5.500 horas al año.

La energía actual consumida por el motor es de:

$$\text{KWh} = 34\text{kW} \times 5.500 \text{ horas/año} = 187.000 \text{ kWh/año}$$

El deslizamiento está determinado por:

Deslizamiento = Velocidad de sincronismo (RPM) - velocidad del rotor (RPM)

$$\text{Deslizamiento} = 3.600 - 3.580 = 20 \text{ RPM}$$

El factor de carga está dado por:

$$\text{Factor de carga} = \frac{\text{Deslizamiento}}{\text{RPM}_{\text{síncronas}} - \text{RPM}_{\text{de placa}}} \times 100$$

$$\text{Factor de carga} = 20 / (3.600 - 3.570) \times 100 \% = 66,67 \%$$

La eficiencia del motor está dada por:

$$\text{Eficiencia} = (\text{Potencia mecánica} / \text{Potencia eléctrica}) \times 100$$

$$\text{Eficiencia} = 0,746 \times 40 \text{ HP/kW} / 34 \text{ kW} = 88\%$$

La potencia real entregada según su factor de carga es está dada por:

$$\text{HP}_{\text{salida}} = \text{Factor de carga} \times \text{Potencia de placa}$$

$$\text{HP}_{\text{salida}} = 0,6667 \times 40 = 26,67 \text{ HP}$$

Se piensa cambiar dicho motor por uno de alta eficiencia con exactamente los mismos datos pero con una eficiencia de 94% a 66,67% de la carga.

$$P_{\text{eléctrica}} = P_{\text{mecánica}} / \text{eficiencia}$$

$$P_{\text{eléctrica}} = 0,746 \times 40 \text{ HP} / 0,94 = 31,74 \text{ kW}$$

El ahorro de energía por sustituir el motor actual por uno de alta eficiencia es de:

$$\text{Ahorro} = 34 \text{ kW} - 31,74 \text{ kW} = 2,26 \text{ kW}$$

2. Si se mantiene este motor trabajando a la misma razón carga de manera constante, durante 5.500 horas al año. ¿Cuánto ahorro se obtuvo por la sustitución del motor y cuánto es el tiempo de recuperación?

$$\text{Ahorros anuales} = 2,26 \text{ kW} \times 5.500 \text{ horas/año} = 12.430 \text{ kWh/año}$$

Suponiendo un costo por cada kWh de US \$0,15 se tiene:

$$\text{Ahorro Anual} = \text{US\$}0,15 \times 12.430 = \$ 1.864$$

La recuperación de la inversión para un motor Premium es de:

$$\text{PSR} = \text{US\$}7.024 / \text{US\$}1.864 = 4 \text{ años}$$

Suponiendo un costo del motor de US\$7.024.

3. Si el motor está trabajando a una carga del 66.67% y el motor utilizado es de 40 HP, ¿Es factible sustituir el un motor por uno de menor potencia (30 HP) para que funcione a mayor carga, pero menos consumo de energía?

Se propone usar un motor de 30 HP con una eficiencia del 93% al 100 % de la carga

Puede llevar la carga este motor?

$$P_{\text{eléctrica}} = 0,746 \times 30 \text{ HP} / 0,93 = 24,1 \text{ kW}$$

El motor actual de 40 hp y con un FC de 66,67%, lleva una carga en su eje de:

$$\text{HP}_{\text{eje}} = 40 \text{ hp} \times 0,746 \text{ kW/hp} \times 0,6667 = 20 \text{ kW}$$

El nuevo motor de 30 hp debe operar con un factor de carga de:

$$\text{FC} = 20 / (30\text{hp} \times 0,746) = 90 \%$$

El motor de 30 HP puede llevar la carga sin problemas, si opera a un factor de carga del 90%.

El ahorro de energía sería:

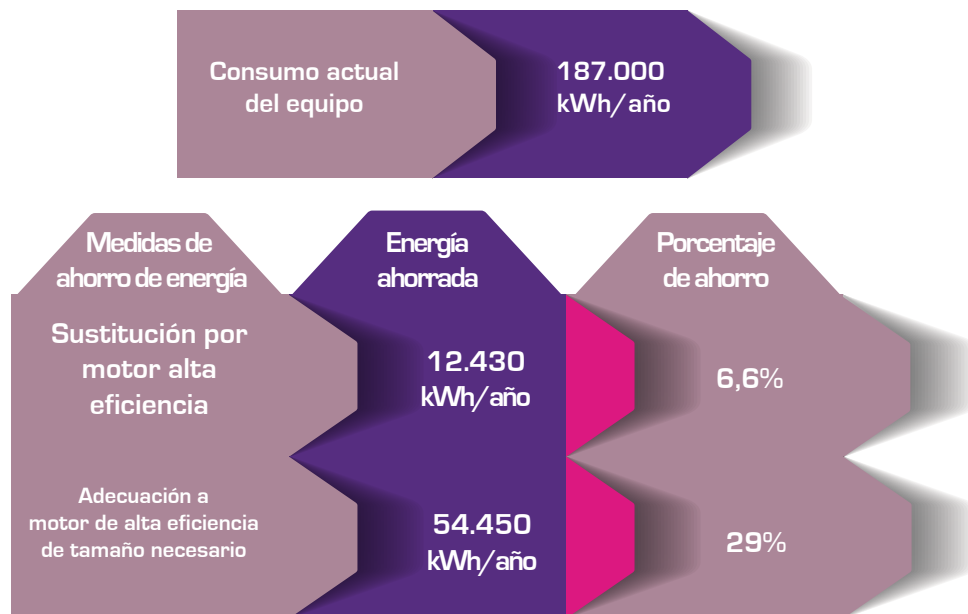
$$\text{Ahorro anuales} = 34\text{kW} - 24,1\text{kW} = 9,9 \text{ kW}$$

$$\text{Ahorros anuales} = 9,9 \text{ kW} \times 5.500 \text{ h / año} = 54.450 \text{ kWh/año}$$

Suponiendo un costo por cada kWh de US\$ 0,15 entonces,

$$\text{Ahorro Anual} = 0,15 \times 54.450 = \$ 8.168$$

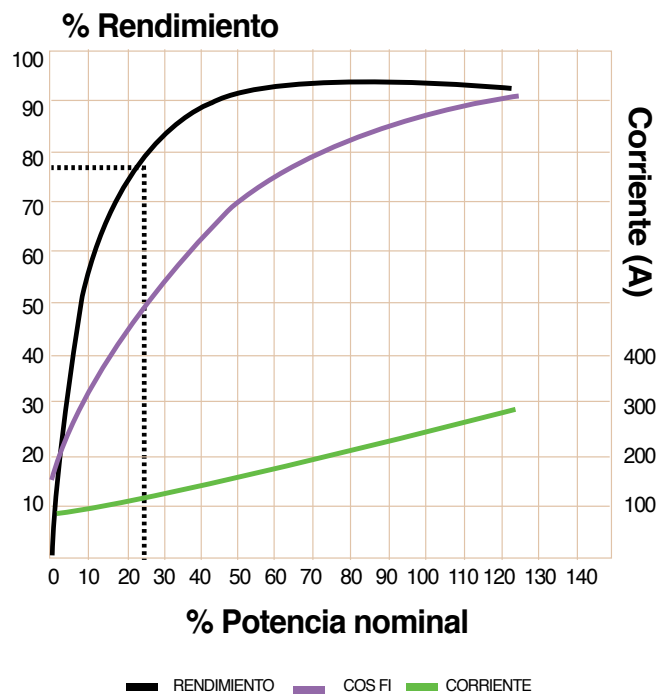
Resumen de ahorros de energía:



Sobredimensionamiento de motores

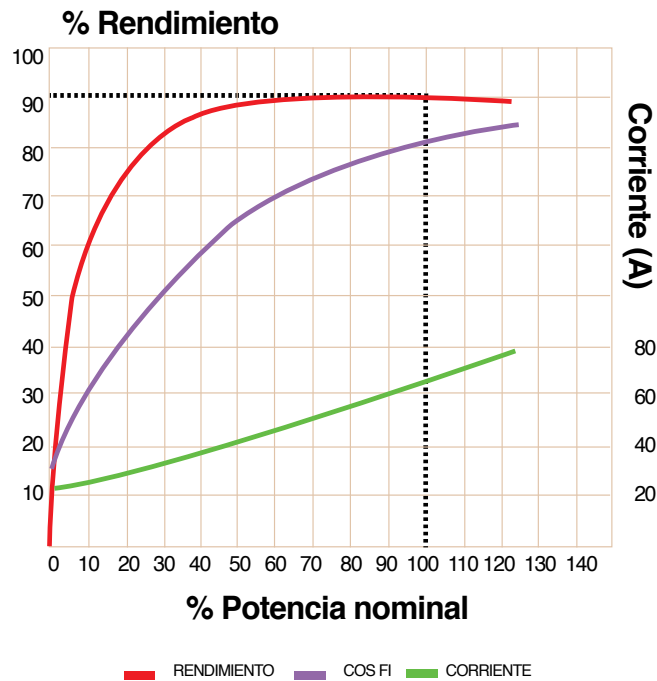
El sobre dimensionamiento de motores eléctricos es uno de los principales factores de desperdicio de energía eléctrica, ya que el motor trabaja en una región donde el rendimiento y el factor de potencia no son los óptimos. A modo de ejemplo, consideremos un motor de 100 HP operando solamente con un 25% de la carga, es decir, haciendo el trabajo de un motor de 25 HP. Analizando la figura siguiente, observamos que el rendimiento del motor es de aproximadamente 78% y su factor de potencia está en torno al 0.5.

Curva de desempeño de un motor de 100 HP



Haciendo el mismo análisis con un motor correcto (de 25 HP), observamos en la figura siguiente que para la condición de 100% de la carga los valores de rendimiento y factor de potencia están en puntos optimizados, siendo respectivamente de 90.1% y de 0.82.

Curva de desempeño de un motor de 25 HP



Teniendo como base estas informaciones, podemos calcular el consumo de los motores para los dos casos mencionados.

- a) Motor de 100 HP (sobre dimensionado) operando con carga en el eje a un 25%

$$P_{\text{motor de 100 HP al 25\% de carga}} = 25 \times 0,746 / 0,78 = 23,91 \text{ kW}$$

- b) Motor de 25 HP (dimensionado correctamente) al 100% de su carga.

$$P_{\text{motor de 25 HP al 100\% de carga}} = 25 \times 0,746 / 0,901 = 20,7 \text{ kW}$$

Podemos observar que al dimensionar correctamente el motor, estamos evitando un desperdicio de energía que, en este caso, es:

$$\text{Ahorro} = 23,91 - 20,7 = 3,21 \text{ kW}$$

Un porcentaje de ahorro de 13,4%.

El gobierno alemán, por medio de la cooperación alemana Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), apoya la región centroamericana a través de su Programa Energías Renovables y Eficiencia Energética (4E) en mejorar las condiciones marco, así como las capacidades tanto institucionales como personales, para el fomento de las energías renovables, la eficiencia energética y la mitigación del cambio climático. Es en el marco de este proyecto que la GIZ apoya al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) en la elaboración del presente producto informativo, con el fin de promover el uso racional y eficiente de la energía, así como un aprovechamiento estratégico y sostenible de las fuentes renovables de energía disponibles en Costa Rica.

BUENAS PRÁCTICAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA Motores Eléctricos Industriales



Contenido elaborado por:
Gerencia Electricidad
UEN Servicio al Cliente
Área Conservación de Energía

Teléfonos
(506) 2000-7460
(506) 2000-5673
(506) 2000-8041

eficienciaenergetica@ice.go.cr

www.grupoice.com