



MANUAL DE OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE MOTORES ELÉCTRICOS INDUSTRIALES

SEPTIEMBRE DE 2018



Eficiencia Energética
Industrial en Colombia

MANUAL DE OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE MOTORES ELÉCTRICOS INDUSTRIALES

SEPTIEMBRE DE 2018

DERECHOS Y PERMISOS

Copyright © Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial, 2018

Todos los derechos de uso y reproducción total o parcial de esta publicación quedan reservados. Se permitirá la reproducción parcial o total del documento cuando esta se realice para fines académicos sin propósitos comerciales, o de beneficio o reconocimiento individual.

Así mismo, cualquier uso total o parcial para adaptaciones o traducciones del contenido del presente documento, deberá contar con la autorización específica de UPME y ONUDI. Se debe solicitar en cada caso la autorización de producción a la ONUDI, dirigida a Marco Matteini, M.Matteini@unido.org

PRÓLOGO

La energía es un prerequisite fundamental para el desarrollo y la actividad económica. Es evidente, sin embargo, que los patrones de suministro y consumo de energía actual son ambientalmente insostenibles y deben ser mejorados. El mandato de la ONUDI de promover el Desarrollo Industrial Sostenible e Inclusivo (ISID, por sus siglas en inglés), entre otros, consiste en desacoplar el desarrollo industrial del uso de recursos de manera insostenible y sus impactos negativos ambientales asociados. A través del ISID, la ONUDI también se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) – incluido el ODS 9 (“Construir infraestructura resiliente, promover la industrialización inclusiva y sostenible, y fomentar la innovación”) y el ODS 7 (“Garantizar el acceso a servicios asequibles, confiables y sostenibles y energía moderna para todos”).



A medida que el mundo en desarrollo se embarca gradualmente en el crecimiento industrial y la participación en el comercio mundial, el aumento de los costos de la energía y el considerable aumento previsto en la demanda de energía hacen que la eficiencia energética sea una prioridad definida. Por un lado, la eficiencia energética tiene sentido comercial, ya que conlleva ahorros de costes y mejoras al optimizar el uso de los recursos y reducir la generación de residuos o desechos. Por otro lado, la eficiencia energética contribuye a mitigar el impacto negativo del uso y consumo de energía en el medioambiente, tanto a nivel local como global; un enfoque más consciente de los recursos permite que se haga más con menos. Entre otros beneficios, la eficiencia energética conduce a un mejor desempeño energético, mayor fiabilidad operativa, fortalecimiento de la seguridad del suministro y la reducción de la volatilidad del precio de la energía.

La industria es responsable de alrededor de un tercio de las emisiones globales de CO₂. Si el mundo propende por los objetivos de mitigación del cambio climático establecidos por la comunidad internacional, la industria requerirá aumentar sustancialmente su eficiencia energética, y cambiar progresivamente a tecnologías de bajo carbono y de bajas emisiones, incluidas las fuentes de energía renovables.

La ONUDI proporciona una variedad de herramientas para abordar el desafío inmediato de implementar las mejores políticas, tecnologías y prácticas disponibles para la eficiencia energética industrial a través de intercambio o transferencia de conocimientos, desarrollo de capacidades, demostraciones, inversiones y asociaciones o alianzas.

La ONUDI ayuda a aumentar el potencial comercial de la industria introduciendo y mejorando las prácticas de gestión de la energía y sus métodos de contabilidad. El presente Manual para la evaluación y optimización de sistemas de motores eléctricos industriales, busca proporcionar dirección y apoyo a las empresas tratando de optimizar sus sistemas de bombeo existentes y ser un recurso de conocimiento adicional para proveedores de servicios de eficiencia energética industrial.

RECONOCIMIENTOS

La presente edición es un producto del programa 5828 GEF/UPME/ONUDI para la “Promoción de la Eficiencia Energética Industrial en las industrias colombianas” – EEI Colombia, y es posible gracias a los recursos donados por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial – FMMA (GEF, por sus siglas en inglés).

Su contenido incluye pequeños ajustes a la traducción al español del documento originalmente desarrollado por el programa EEI de ONUDI en inglés, para reflejar condiciones particulares del contexto colombiano.

El documento original ha sido desarrollado por el programa de Eficiencia Energética Industrial de ONUDI, bajo la autoría de Aníbal de Almeida, ISR – Universidad de Coímbra, Joao Fong, ISR – Universidad de Coímbra y Hugh Falkner – Atkins.

La traducción al español fue realizada por María Palma y revisada por Filiberto Bojacá Buche.

EXENCIÓN DE RESPONSABILIDAD

Las opiniones aquí expresadas son exclusiva responsabilidad de sus autores, y no expresan la opinión y/o posición institucional de ONUDI, UPME o FMAM sobre los temas tratados.

Cualquier alusión gráfica o escrita a nombres comerciales de organismos o individuos no implica ni un aval, preferencia o recomendación de ONUDI, UPME o FMAM respecto marcas, productos o servicios ofrecidos por dichas personas.

Ni UPME ni ONUDI, así como los autores y personal del programa EEI Colombia asumen responsabilidad legal alguna por la interpretación y uso que se le dé al contenido del presente documento.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA

María Fernanda Suárez Londoño
Ministra

Alfonso Mayelo Cardona Delgado
Viceministro de Energía

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA

Ricardo Ramírez Carrero
Director General

Carlos García Botero
Subdirector de Demanda

Olga Victoria González González
Asesora Subdirección de Demanda

Jonathan David Sanchez Rippe
Profesional especializado Subdirección de Demanda

ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL

Marco Matteini
Industrial Development Officer (Oficial de Desarrollo Industrial)

Johannes Dobinger
Representante - Oficina para Colombia, Guyana, Perú y Surinam

EQUIPO DEL PROGRAMA EEI COLOMBIA

Ricardo Baquero Vergara
Coordinador Técnico Nacional

Ulises Patiño Hernández
Coordinador Capacitaciones en Optimización de Sistemas de Uso Final de la Energía

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN | 13 |
| PARTE 1 | 15 |
| 2 TECNOLOGÍAS DE LOS MOTORES DE ALTA EFICIENCIA ENERGÉTICA | 16 |
| 2.1 Conceptos básicos de los motores de inducción | 16 |
| 2.2 Motores de inducción energéticamente eficientes | 18 |
| 2.3 Motores de imanes permanentes | 22 |
| 2.4 Motores de imanes permanentes de arranque directo | 24 |
| 2.5 Motores de reluctancia conmutada | 25 |
| 3 SISTEMAS DE MOTORES ENERGÉTICAMENTE EFICIENTES | 27 |
| 3.1 Calidad del suministro eléctrico | 28 |
| 3.2 Red de distribución | 29 |
| 3.3 Sobredimensionamiento del motor | 30 |
| 3.3.1 Los efectos del sobredimensionamiento | 30 |
| 3.3.2 Procedimiento recomendado para selección de motores | 32 |
| 3.4 Sistema de transmisión | 34 |
| 3.5 Prácticas de funcionamiento y mantenimiento | 37 |
| 3.6 Gestión y alternancia en ciclos de las cargas | 38 |
| 4 VARIADORES DE VELOCIDAD (VSD) | 39 |
| 4.1 Bombas | 44 |
| 4.2 Ventiladores | 46 |
| 4.3 Compresores | 48 |
| 4.4 Ascensores | 49 |
| 4.5 Máquinas centrifugadoras y máquinas-herramientas | 50 |
| 4.6 Cintas transportadoras | 51 |
| 5 NORMAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA | 52 |
| 5.1 Reglamentos de eficiencia energética existentes | 53 |
| 5.2 Políticas y programas de incentivos | 58 |

| | |
|--|----|
| PARTE 2 | 63 |
| 6 EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE LOS SISTEMAS DE MOTORES | 65 |
| 7 MEDICIONES | 70 |
| 8 ENERGÍA Y MANTENIMIENTO | 72 |
| 8.1 Beneficios de la mejora del mantenimiento | 72 |
| 8.2 Técnicas de mantenimiento de motores | 72 |
| 8.3 Decisiones de mantenimiento: un enfoque alterativo para estimular los ahorros energéticos | 73 |
| 9 REPARACIÓN DE MOTORES | 80 |
| 10 ¡VENDA EL PROYECTO! - CÓMO GANAR ADEPTOS PARA SU IDEA | 84 |
| 11 GESTIÓN DE LA ENERGÍA | 87 |
| 11.1 La importancia de los sistemas de gestión de la energía | 87 |
| 12 REFERENCIAS | 89 |
| 13 TEXTOS Y RECURSOS ADICIONALES | 91 |
| 13.1 Libros de texto | 91 |
| 13.2 Documentos técnicos | 91 |
| 13.3 Normas | 92 |
| 13.4 Otros documentos útiles | 92 |

El Manual de Optimización de Sistemas de Motores (OSM) se elaboró para que sirva como referencia y recurso adicional en el marco de las capacitaciones en OSM del programa de eficiencia energética industrial de la UPME y ONUDI en Colombia – EEI Colombia.

Este Manual de capacitación abarca el funcionamiento de sistemas de fuerza motriz, incluyendo el suministro de electricidad, el subsistema motor/accionador y el subsistema mecánico hasta llegar a los usos de la fuerza motriz en el proceso industrial. En el Manual se describe cada una de las áreas detalladamente y se identifican los parámetros críticos y de importancia, así como las mediciones y otros elementos que deben tenerse en cuenta para emprender la evaluación energética de los sistemas de motores eléctricos de una planta usando un “enfoque de los sistemas.” Además, identifica las oportunidades de mejora del rendimiento para todas las áreas anteriormente mencionadas, a fin de lograr la optimización del sistema de fuerza motriz en su conjunto.

Es importante que todo análisis de los niveles de los sistemas de motores tenga en cuenta las leyes fundamentales de la física. La mayoría de las veces, no es fácil realizar estos análisis manualmente, de manera que el usuario tiene que modelar estas aplicaciones en alguna de las herramientas informáticas existentes. El uso de herramientas informáticas se está haciendo cada vez más común, a medida que la industria se va equipando con sistemas de obtención de datos en “tiempo real” y con paneles de control que permiten modelar y analizar los sistemas de motores eléctricos. Es conveniente que las metodologías que se empleen para analizar sistemas de fuerza motriz se basen en el “enfoque de los sistemas” y en sólidos principios de ingeniería. Los sistemas de fuerza motriz pueden ser modelados usando las herramientas informáticas desarrolladas o patrocinadas por el Departamento de energía de los Estados Unidos para evaluación de sistemas de motores (Motor Master + y las calculadoras de la Oficina de Manufactura Avanzada del Departamento de Energía de los Estados Unidos, entre otras). Estas herramientas sirven para cuantificar los ahorros energéticos y de costos de los proyectos, y constituyen una plataforma excelente para los usuarios de sistemas de motores eléctricos. En el Manual se presentan algunas de estas herramientas informáticas.

De modo general, este Manual de capacitación brinda una metodología sencilla de optimización de sistemas de motores eléctricos industriales, que se basa en un “enfoque de los sistemas,” y ofrece a los expertos ejemplos simples y problemas tipo para que pongan a prueba sus conocimientos a medida que van avanzando en las distintas secciones.

Este manual NO ha sido concebido para reemplazar al Curso de capacitación de expertos con presencia en el aula y en una instalación, y a cargo de un profesor. No obstante, puede usarse para la formación de usuarios finales y consultores de energía, a fin de capacitarlos en la evaluación y optimización de los sistemas de fuerza motriz. El único objetivo del manual consiste en identificar, cuantificar y posibilitar ahorros de energía y de costos, a través de la operación correcta y los controles apropiados, del mantenimiento del sistema, del uso correcto de la fuerza motriz en los procesos y de la aplicación de tecnologías acordes con el estado actual de los avances en los sistemas de motores eléctricos industriales.

1

INTRODUCCIÓN

Este manual es parte integral del programa de capacitación de USUARIOS en Optimización de Sistemas de Motores (OSM) de la ONUDI. El programa de capacitación de USUARIOS en OSM está dirigido a ingenieras e ingenieros de instalaciones, personal de operación y de mantenimiento de las empresas, personal de venta de motores o equipos y de provisión de servicios. La capacitación de usuarios en OSM ha sido diseñada principalmente para aumentar y consolidar la comprensión del rendimiento de los motores y los sistemas eléctricos, y para crear capacidades técnicas a fines de iniciar el desarrollo y la implementación de medidas y proyectos de OSM.

El presente manual ha sido concebido como una fuente de información suplementaria y complementaria del curso de capacitación de usuarios en OSM de dos días de duración.

En el dominio público, hay una gran cantidad de publicaciones y de literatura técnica (incluidos muchos documentos orientativos) sobre el rendimiento energético de los motores eléctricos, normas y optimización de sistemas de motores. En este manual hemos tratado de usar el material y las herramientas existentes de la manera más efectiva: en algunos temas determinados, indicamos directamente las publicaciones relevantes.

La primera parte del manual contiene una descripción sucinta del estado actual de las tecnologías usadas para desarrollar motores de alta eficiencia, incluidos motores de inducción de eficiencia Premium, motores de imanes permanentes y motores de reluctancia conmutada.

Asimismo, el manual analiza algunas cuestiones vinculadas con la eficiencia de los sistemas de motores y brinda orientaciones acerca de cómo hacer frente a dichas cuestiones mediante:

- La selección de motores energéticamente eficientes.
- El dimensionamiento correcto de los motores.
- El uso de variadores de velocidad (en inglés, ASD, VSD o VFD), si procede. El uso de variadores de velocidad sirve para controlar mejor los procesos y disminuir el desgaste mecánico de los equipos y el ruido acústico, y puede generar ahorros energéticos significativos.
- La optimización de todo el sistema, incluyendo la red de distribución, la calidad del suministro eléctrico y la eficiencia de las transmisiones.
- La aplicación de mejores prácticas de mantenimiento.

También contiene una presentación de las normas de rendimiento energético y de los programas de promoción de motores eléctricos de alta eficiencia en el mundo.

La segunda parte del manual analiza más detalladamente algunas cuestiones clave, tales como:

- Evaluación energética de los sistemas de motores.
- Importancia y beneficios del mantenimiento correcto de los motores y técnicas relevantes.
- Mediciones.
- Proceso para tomar la decisión de reparar o reemplazar.
- Políticas de gestión de motores.
- Sistema de gestión de la energía.
- Cómo vender la idea de OSM a la dirección de la empresa.



PARTE

1

TECNOLOGÍAS DE LOS MOTORES DE ALTA EFICIENCIA ENERGÉTICA

En las últimas décadas, los fabricantes y los usuarios finales empezaron a prestar cada vez más atención a la eficiencia energética de los motores eléctricos. Se hicieron algunos esfuerzos para desarrollar nuevas maneras de aumentar la eficiencia de los motores de inducción trifásicos y están apareciendo otras soluciones tecnológicas que pueden alcanzar niveles de eficiencia cada vez mayores. Esta sección contiene una breve descripción de estas soluciones tecnológicas de gran eficiencia.

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN

La gran mayoría de los motores industriales son motores de inducción de jaula de ardilla (figura 1 y figura 3), debido a su bajo costo, alta fiabilidad y eficiencia bastante alta. No tienen conexiones eléctricas con el rotor, lo que significa que no hay escobillas, ni conmutadores ni anillo colectores que mantener ni reemplazar.

La velocidad de un motor de inducción está determinada esencialmente por la frecuencia de la fuente del suministro eléctrico y por la cantidad de polos del motor.

$$velocidad\ sincrona\ [rpm] = \frac{frecuencia\ de\ la\ tensión\ aplicada\ [Hz] \times 60}{número\ de\ pares\ de\ polos}$$

$$deslizamiento\ [\%] = \frac{velocidad\ sincrona - velocidad\ de\ marcha}{velocidad\ sincrona} \times 100$$

Sin embargo, la velocidad disminuye en un pequeño porcentaje cuando el motor pasa de la condición de vacío (sin carga) a funcionar a plena carga (figura 2).

Figura 1. Diagrama de un motor de inducción de jaula de ardilla

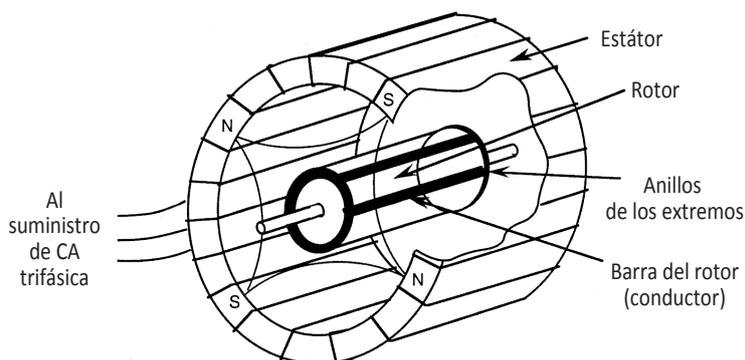


Figura 2. Curva típica de par-velocidad de un motor de inducción de CA trifásico

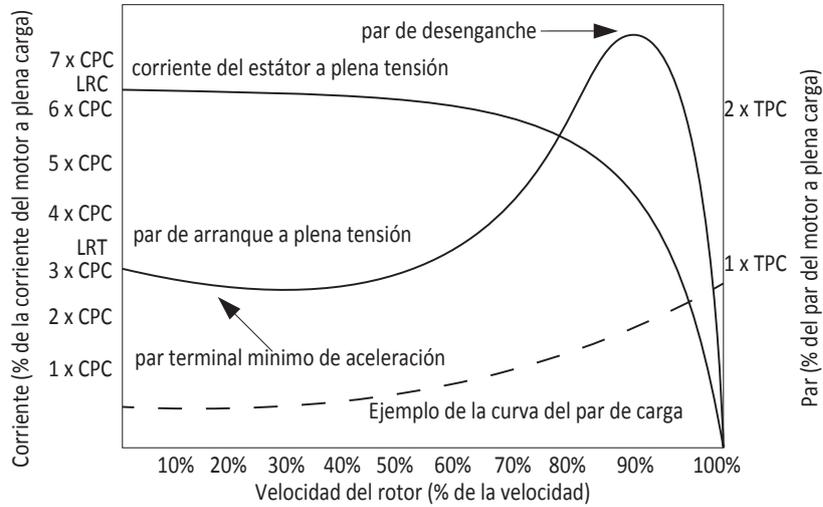
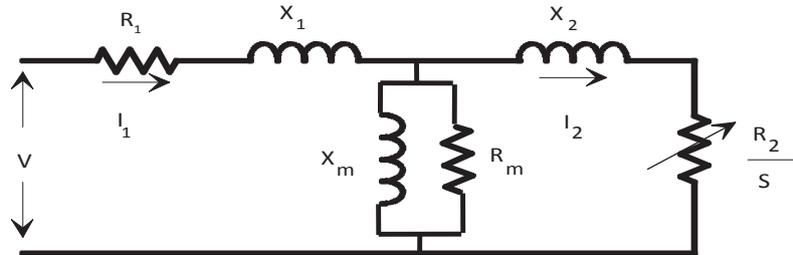


Figura 3. Circuito equivalente de un motor de inducción de jaula de ardilla



R_1, R_2 = Resistencia del estátor y del rotor

X_1, X_2 = Reactancia de dispersión del estátor y del rotor

X_m = Reactancia de magnetización

R_m = Resistencia de magnetización

ω = Velocidad síncrona

S = Deslizamiento = $(\omega - \omega_{rotor}) / \omega$

Las características principales de los motores de inducción son:

- Baja complejidad de construcción.
- Alta fiabilidad (sin desgaste de escobillas), incluso aunque se obtengan velocidades muy altas.
- Eficiencia media a potencia baja (inferior a 2,2 kW), eficiencia alta a potencia alta.
- Accionado directamente por la red eléctrica o a través de variadores de frecuencia.
- Baja interferencia electromagnética (EMI).
- Posibilidad de control de velocidad en lazo abierto.
- El menor costo por kW de todas las tecnologías de motores.

2.2 MOTORES DE INDUCCIÓN ENERGÉTICAMENTE EFICIENTES

En general, la eficiencia del motor se define como:

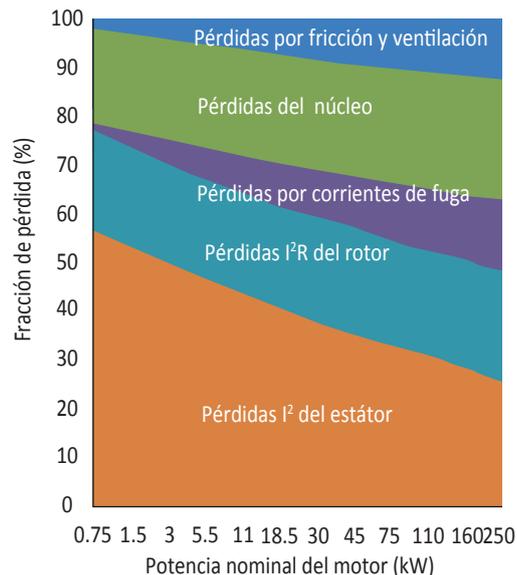
$$Eficiencia = \frac{Potencia\ de\ salida\ (mecánica)}{Potencia\ de\ entrada\ (eléctrica)}$$

La diferencia entre la potencia de salida mecánica y la potencia de entrada eléctrica se debe a cinco diferentes tipos de pérdidas que ocurren en la máquina: pérdidas eléctricas, pérdidas magnéticas, pérdidas mecánicas y pérdidas por corrientes de fuga, y, en el caso de los motores de escobillas, pérdidas por contacto de las escobillas.

- **Pérdidas eléctricas** (también llamadas efecto Joule) se expresan mediante I^2R y, en consecuencia, aumentan rápidamente con la carga del motor. Las pérdidas eléctricas aparecen como calor generado por la resistencia eléctrica a la corriente que fluye en el devanado estatórico, en las barras de la jaula y en los anillos de esta.
- **Las pérdidas magnéticas** (o pérdidas del núcleo) ocurren en el laminado de acero del estátor y del rotor. Se deben a la histéresis y a las corrientes de Foucault, y aumentan aproximadamente con la densidad del flujo magnético al cuadrado.
- **Las pérdidas mecánicas** (o pérdidas por fricción y ventilación) se deben a la fricción en los rodamientos y a la potencia usada por el motor para su autoventilación.
- **Las pérdidas por corrientes de fuga** se deben al flujo de dispersión, a los armónicos de la densidad de flujo del entrehierro (espacio de aire entre estator y rotor), a la falta de uniformidad de la distribución de las corrientes entre las barras, a las imperfecciones mecánicas del entrehierro y a las irregularidades en la densidad de flujo en el entrehierro.
- **Las pérdidas por contacto de las escobillas** se deben a la caída de tensión en las escobillas y el conmutador/anillos colectores, así como a la fricción entre los contactos móviles.

A modo de ejemplo, la figura 4 muestra la distribución de las pérdidas de un motor de inducción.

Figura 4. Fracción típica de pérdidas de un motor de inducción de 50 Hz de cuatro polos (1)

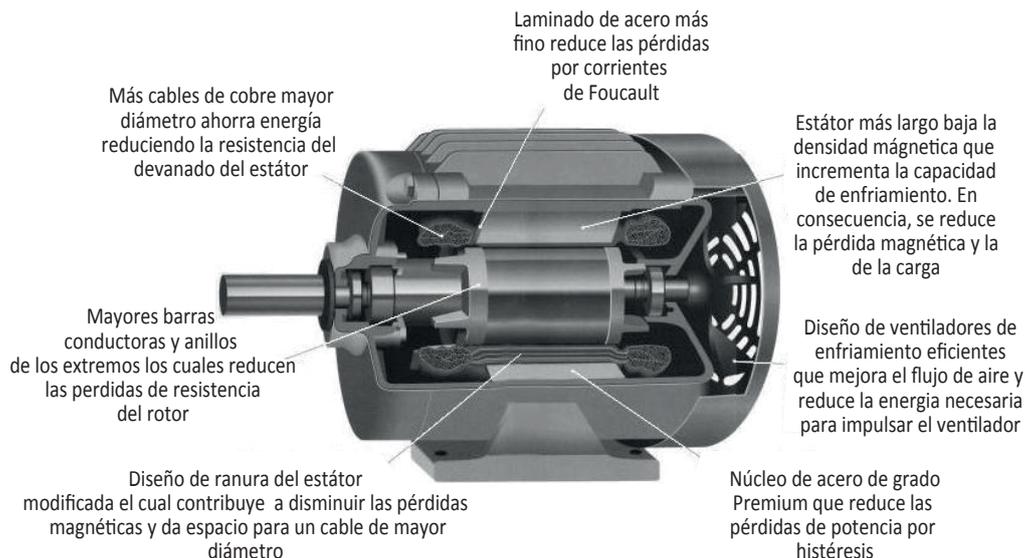


Los motores de inducción más eficientes disponibles del mercado mundial actualmente tienen niveles de eficiencia que superan los requisitos mínimos de IE4. Esto representa una disminución de las pérdidas de alrededor del 15% con relación a los motores de eficiencia premium (IE3) disponibles en el mercado de la UE.

Los motores de alta eficiencia, por lo general, se construyen con materiales magnéticos superiores, circuitos magnéticos más grandes con laminados más finos, devanados del estátor y del rotor con secciones eficaces mayores de cobre o de aluminio, tolerancias más estrictas, mejor control de la calidad y diseño optimizado. Estos motores, por lo tanto, tienen menos pérdidas y son más eficientes. Gracias a sus menores pérdidas, pueden funcionar a menor temperatura, lo que los hace más fiables.

En la figura 5, se presentan algunas de las opciones para mejorar la eficiencia de los motores de inducción.

Figura 5. Características de los motores NEMA Premium



Se pueden reducir las pérdidas en el estátor aumentando la sección eficaz del devanado estatórico, lo que hace disminuir la resistencia eléctrica, reduciendo las pérdidas I^2R . Esta modificación es la que produce las mayores ganancias de eficiencia. En general, los motores de alta eficiencia contienen aproximadamente un 20% más de cobre que los modelos de eficiencia estándar de tamaño y régimen nominal equivalentes.

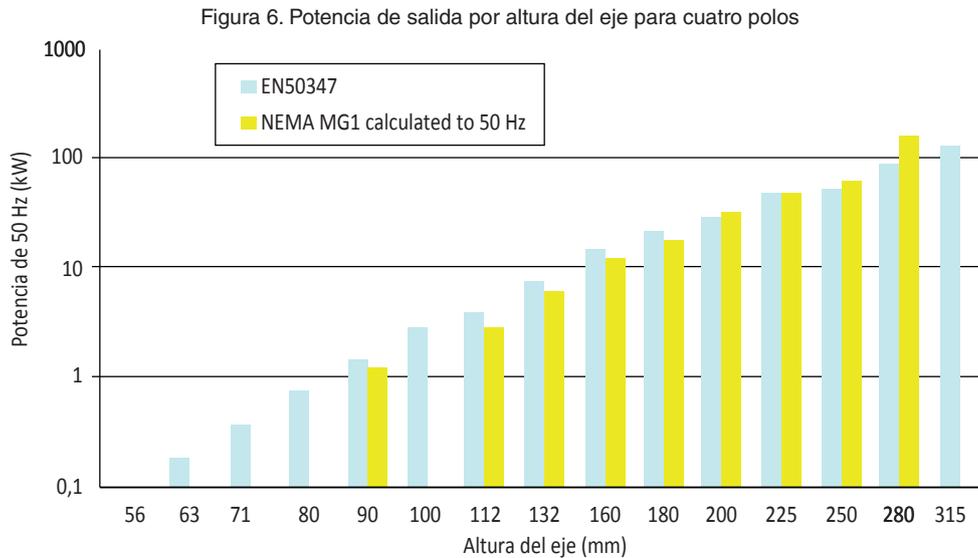
Al aumentar la sección eficaz de los conductores del rotor (barras de la jaula y sus anillos) o al incrementar su conductividad (por ejemplo, usando cobre en lugar de aluminio), y en menor medida, al aumentar el flujo total a través del entrehierro entre el rotor y el estátor, se reducen las pérdidas del rotor.

Las pérdidas en el núcleo magnético se producen en el laminado de acero del estátor o del rotor y se deben principalmente a los efectos de histéresis y a las corrientes de Foucault inducidas. Ambos tipos de pérdidas aumentan aproximadamente con la densidad del flujo magnético al cuadrado. Si se alarga el apilado del laminado se reduce la densidad de flujo dentro del mismo y, por lo tanto, se reducen las pérdidas en el núcleo. Las pérdidas pueden reducirse aún más a través del uso en los laminados de acero magnético con mejores propiedades magnéticas (por ejemplo, mayor permeabilidad y resistividad). Otra manera de reducir las pérdidas magnéticas del núcleo por corrientes de Foucault consiste

en reducir el espesor del laminado. También es posible reducir las pérdidas por corrientes de Foucault asegurándose de que haya un aislamiento adecuado entre los laminados, lo que minimiza el flujo del corriente (y las pérdidas I^2R) a través del apilado.

Los materiales adicionales que se usan para mejorar la eficiencia pueden representar un problema, ya que puede resultar difícil adaptarse a los tamaños constructivos normalizados, especialmente para el rango de potencia bajo. Por supuesto, esto no siempre es el caso, puesto que, en muchos casos sólo los laminados del estátor y del rotor son un poco más largos, lo que puede compensarse en parte si se usa un ventilador más pequeño, ya que las pérdidas térmicas que hay que disipar son menores.

La figura 6 muestra la relación entre la potencia y la altura del eje, teniendo en cuenta los distintos tamaños constructivos normalizados para motores de cuatro polos en Europa y en América del Norte.



Una manera de reducir las pérdidas I^2R consiste en reemplazar las barras del conductor de aluminio por barras de cobre (figura 7). Debido a la excelente conductividad eléctrica del cobre (57 MS/m en comparación con 37 MS/m), al reemplazar el aluminio de las barras del conductor de un rotor por cobre fundido, se puede mejorar la eficiencia de un motor eléctrico significativamente. Si además de este reemplazo se rediseña el motor teniendo en cuenta la mayor conductividad del cobre, se puede alcanzar una mejora de la eficiencia aún mayor.

Figura 7. Motor de rotor de cobre y vista en corte (Fuente: Copper Development Association)

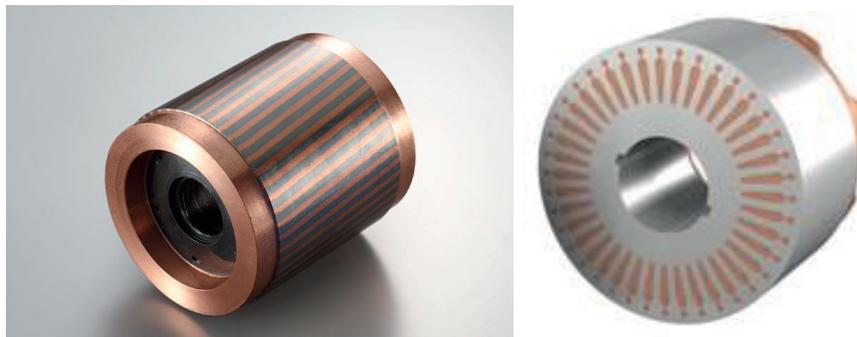


Figura 8. Comparación de la eficiencia de un rotor de aluminio y uno de cobre en un motor de 5,5 kW, por otra parte idénticos (2)

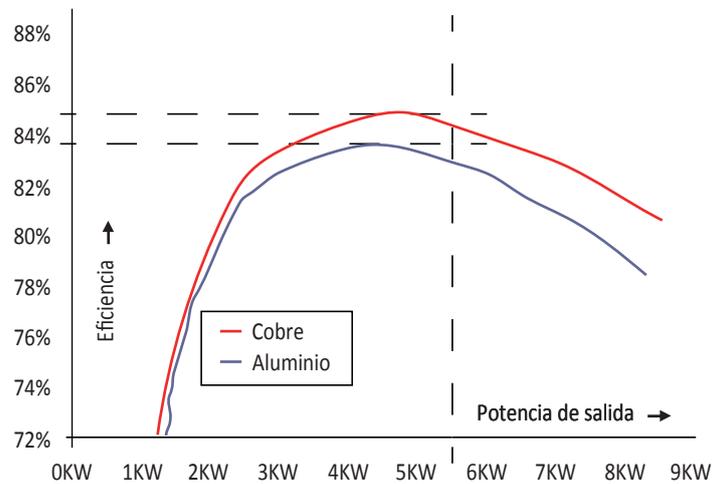
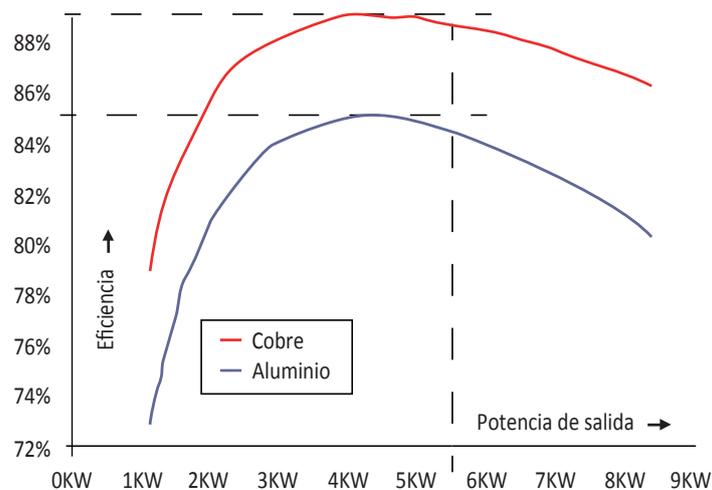


Figura 9. Comparación de la eficiencia de un motor de rotor de aluminio y de un motor de rotor de cobre de eficiencia optimizada de 5,5 kW (2)



Debido a la mayor eficiencia del rotor de cobre, el largo del rotor es menor, y por lo tanto, el motor puede ser más pequeño que un motor de aluminio de la misma potencia y clasificación de eficiencia. Esto permite que los motores de alta eficiencia cumplan con los tamaños constructivos normalizados. De no ser así, sería extremadamente difícil.

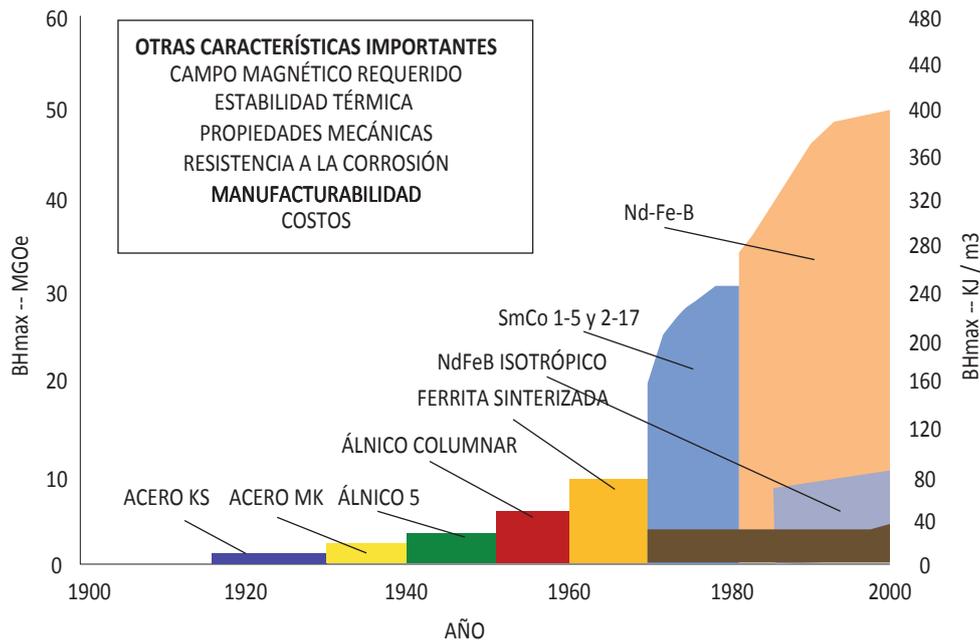
Al principio, el punto de fusión más elevado del cobre (1083°C con respecto a los 669°C del aluminio) fue un obstáculo en la producción a gran escala de rotores de cobre fundido, debido a la corta vida útil de los moldes. Este problema se ha superado con éxito y varios fabricantes ya están produciendo motores de inducción con rotores de cobre de manera económicamente eficaz.

2.3 MOTORES DE IMANES PERMANENTES

Un motor de imanes permanentes es una máquina eléctrica rotativa en la que el estátor es un estátor trifásico clásico, como en los motores de inducción, y el rotor tiene imanes permanentes que crean el campo magnético del rotor sin incurrir en pérdidas por excitación. A diferencia de los motores de corriente continua (CC) de escobillas, la conmutación de los motores de corriente continua CC sin escobillas (BLDC) o motores de conmutación electrónica (EC) se controlan electrónicamente. Normalmente, para funcionar de manera correcta, estos motores requieren un convertidor de frecuencia y un sensor de la posición del rotor (codificador o encoder). En algunos diseños, en lugar de un codificador se utiliza un algoritmo de control en el convertidor. El suministro de corriente alterna se convierte en un suministro de corriente continua que alimenta un inversor con modulación por ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés), que genera una onda sinusoidal que se suministra al devanado estatórico. Para girar, los devanados estatóricos deberían ser energizados en una secuencia. Es importante saber la posición del rotor para poder entender qué devanado está siendo energizado siguiendo la secuencia de energización. La posición del rotor se establece usando sensores de efecto Hall incorporados al estátor o al rotor, aunque últimamente ya están apareciendo diseños sin sensores.

El material magnético y la geometría correctos para hacer el rotor se seleccionan sobre la base de la densidad del campo magnético del rotor que se requiera.

Figura 10. Avances en los productos de energía magnética



Tradicionalmente, se usan imanes de ferrita para hacer imanes permanentes para aplicaciones de bajo costo. A medida que la tecnología avanza y que los costos van decreciendo, los imanes de aleaciones de tierras raras van ganando popularidad. Los imanes de ferrita son más económicos, pero tienen la desventaja de tener una densidad de flujo menor para un volumen determinado. Por el contrario, el material de aleación tiene una densidad magnética mayor, lo que mejora la relación entre el tamaño y el peso, y tiene un par mayor que el de un motor de imanes de ferrita del mismo tamaño. Algunos ejemplos de aleaciones de tierras raras usadas en los imanes de los motores de alto rendimiento son el cobalto

samarico (SmCo) y la aleación de neodimio, ferrita y boro (NdFeB). Se sigue investigando permanentemente para mejorar la densidad de flujo a fin de comprimir el volumen del motor cada vez más.

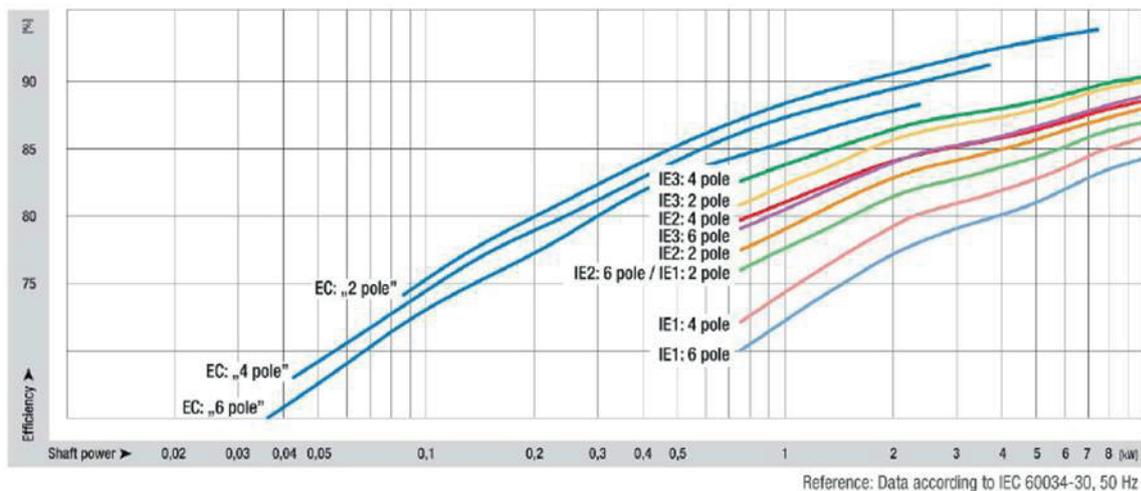
Esta evolución se ilustra en la Figura 10, donde se puede apreciar la calidad magnética de los materiales usados expresada en densidad de energía (también conocida como Producto de Máxima Energía), designada como BH_{max} y cuyas unidades son Mega-Gauss*Oesterd (MGOe) en el sistema CGS (Centímetro-Gramo-Segundo), o KJ/m^3 en el Sistema Internacional de Unidades.

Los motores de imanes permanentes son un tipo de motor síncrono. Esto significa que el campo magnético generado por el estátor y el campo magnético generado por el rotor giran a la misma frecuencia. Los motores de imanes permanentes no experimentan el “deslizamiento” que se observa normalmente en los motores de inducción.

Los motores que usan imanes permanentes son significativamente más eficientes que los motores de inducción porque no tienen devanados secundarios en los rotores, lo que elimina casi completamente las pérdidas del rotor.

En el rango de baja potencia y en aplicaciones que requieren un control de velocidad variable, los motores de imanes permanentes pueden mejorar la eficiencia hasta un 10-15% en comparación con los motores de inducción de velocidad variable, como se muestra en la figura 11.

Figura 11. Eficiencia de motores EC/BLDC (fuente EBM-Papst)

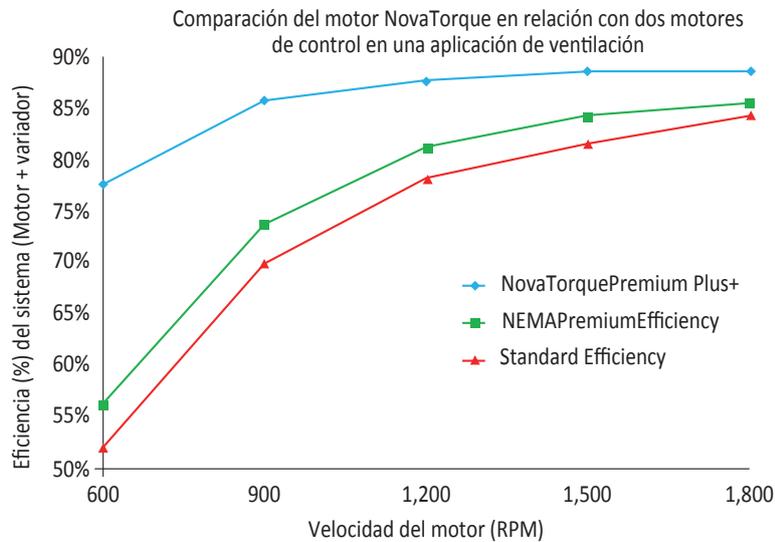


Además, son mucho más eficientes que los motores CC de escobillas, ya que eliminan las pérdidas del circuito de excitación.

Los motores de imanes permanentes presentan un gran potencial de ahorros y han ido ganando importancia en el mercado en algunas aplicaciones concretas, como controles de movimiento de alto rendimiento, en algunos tipos de ventiladores de velocidad variable y también en algunos electrodomésticos de alta eficiencia (p. ej., unidades de aire acondicionado).

Basado en una geometría innovadora del rotor y del estátor, el motor NovaTorque usa imanes de ferrita que son más económicos, pero al mismo tiempo alcanza niveles de rendimiento que en general solo se encuentran en motores de imanes permanentes hechos con tierras raras, que son mucho más caras.

Figura 12. Eficiencia del sistema de los motores de imanes de ferrita (NovaTorque) con respecto a los motores de inducción NEMA Premium y estándar impulsados por un variador de frecuencia

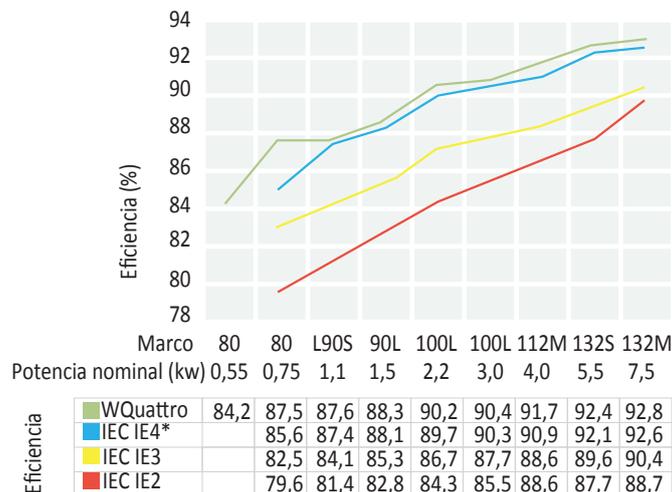


2.4 MOTORES DE IMANES PERMANENTES DE ARRANQUE DIRECTO

Otra tecnología de muy alta eficiencia que algunos fabricantes introdujeron en el mercado recientemente son los motores de imanes permanentes de arranque directo (LSPMM). Como su nombre lo indica, el motor no necesita un controlador electrónico, ya que puede arrancar a través de la conexión directa con la red de alimentación. Estos motores tienen imanes permanentes instalados en el rotor del motor de inducción de jaula de ardilla, lo que les da la capacidad de arrancar por acoplamiento directo con una fuente de alimentación de CA (y por lo tanto, no necesitan usar un variador de velocidad) y tienen una eficiencia muy alta durante la marcha síncrona.

Para alcanzar niveles de eficiencia muy altos (IE4 - Super Premium), se usan en los imanes permanente materiales de alta energía magnética, como NeFeB.

Figura 13. Eficiencia de los motores LSPM disponibles comercialmente LSPM (fuente: WEG)



Dado que el motor funciona como una máquina síncrona, las corrientes inducidas en el rotor son mucho más pequeñas que en las máquinas de inducción y, por lo tanto, el efecto de Joule en el rotor es significativamente menor. Además, es posible alcanzar el factor de potencia unitario, de manera que se reducen las corrientes del estátor y las pérdidas correspondientes (3).

Una de las principales ventajas de estos motores “híbridos” es que son intercambiables por motores de inducción. Su diseño les permite conservar la misma relación potencia/tamaño constructivo de los motores de inducción estándar a pesar de su eficiencia muy alta, y no requieren control de movimiento electrónico como las máquinas de conmutación electrónica o las de imanes permanentes, ya que pueden arrancar desde el reposo con un suministro de frecuencia fija.

2.5 MOTORES DE RELUCTANCIA CONMUTADA

Los motores de reluctancia conmutada son muy simples, robustos y muy fiables. Tienen un estátor de polo saliente con devanados de excitación concentrada y un rotor de polos salientes sin conductores ni imanes permanentes. En torno de cada polo del estátor se devana una bobina y se la conecta, generalmente en serie, con la bobina del polo del estátor diametralmente opuesta, formando un devanado monofásico.

El estátor se caracteriza por una sencilla construcción de hierro laminado con devanados de bobina simple: la ausencia de solapamientos de fases reduce significativamente el riesgo de cortocircuitos entre fases. Las cabezas de bobina más compactas y cortas hacen que el área activa de la bobina sea más eficiente (disminuye el costo del cobre) (4).

Su funcionamiento se basa en el principio de que los rotores de polos salientes se van a ubicar en una posición de mínima reluctancia al flujo en el circuito magnético. Dado que la inductancia es inversamente proporcional a la reluctancia, la inductancia del devanado monofásico es máxima cuando el rotor está en la posición alineada, y mínima cuando el rotor está en la posición no alineada. Por lo tanto, la energización de la fase hará que el rotor se mueva para alinearse con los polos del estátor, como una manera de minimizar la reluctancia del trayecto magnético.

Figura 14. Rotor y estátor de polos salientes de un motor de reluctancia conmutada (fuente: Emerson)

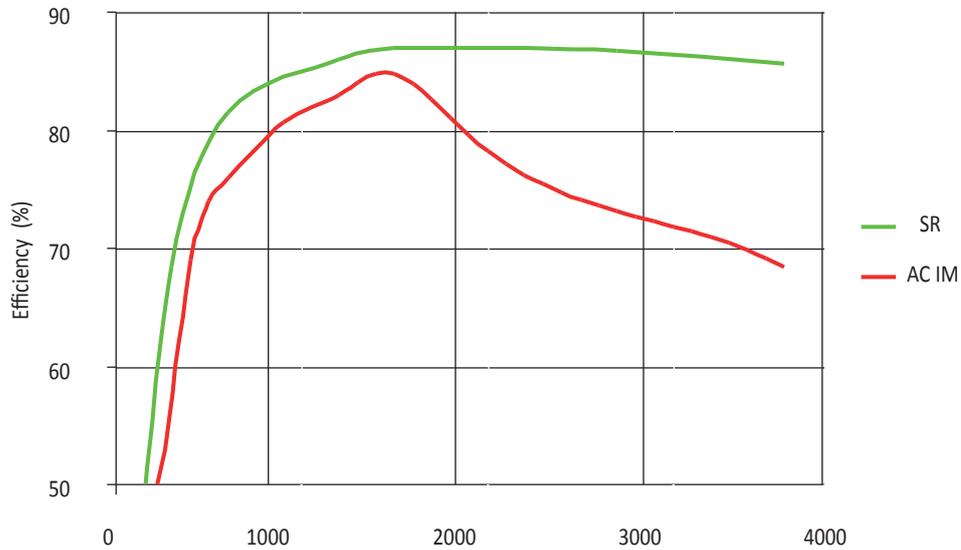


A diferencia de los motores de inducción, los motores de reluctancia conmutada requieren un circuito convertidor de potencia que controle las corrientes de fase para producir movimiento y par continuos. La información sobre la posición del rotor se usa para controlar la energización de la fase de manera óptima. Se puede variar la velocidad cambiando la frecuencia de los pulsos de la corriente de fase al mismo tiempo que se conserva el sincronismo con la posición del rotor.

La naturaleza no-uniforme de la producción del par provoca el rizado del par y contribuye al ruido acústico.

Por lo general, los motores de reluctancia conmutada tienen eficiencias superiores al 90%, incluyendo todas las pérdidas del motor y del controlador, y esa eficiencia se mantiene a través de todo el rango de velocidad y de carga.

Figura 15. Eficiencia del sistema de un motor de reluctancia conmutada (SR) con respecto a un motor de inducción impulsado por un variador de frecuencia



Par constante de 50 Nm hasta 1500 rev. min., subsecuentemente potencia constante de 7,5 kW

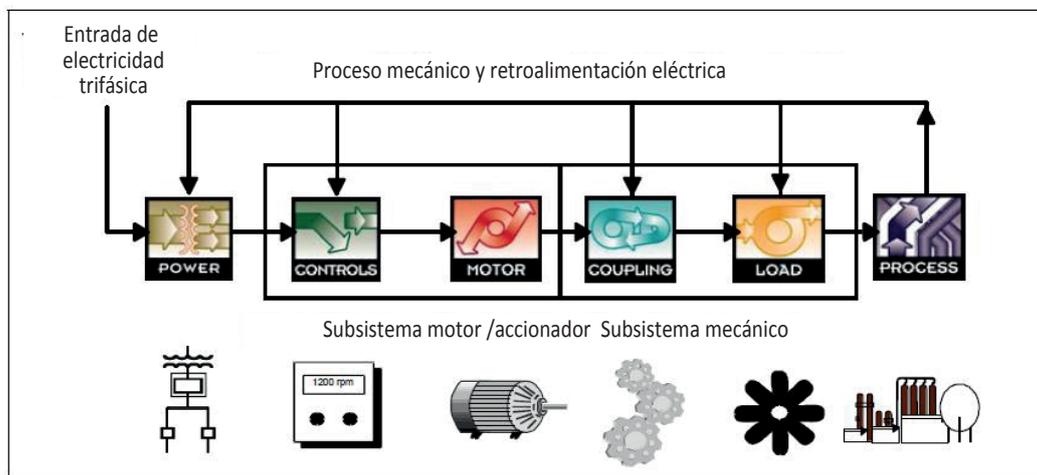
3

SISTEMAS DE MOTORES ENERGÉTICAMENTE EFICIENTES

La eficiencia de un proceso accionado por un motor depende de varios factores entre los cuales se puede incluir:

- Eficiencia del motor.
- Controles de velocidad del motor.
- Calidad del suministro eléctrico.
- Sobredimensionamiento del sistema.
- Red de distribución.
- Transmisiones mecánicas.
- Prácticas de mantenimiento.
- Gestión y alternancia de los ciclos de las cargas.
- Eficiencia de los dispositivos de uso final (por ejemplo, ventilador, bomba, etc.).

Figura 16. Sistema de motores



Debe subrayarse que el diseño del proceso en sí también puede influir en gran medida sobre la eficiencia general (unidades producidas/kWh).

Hay una serie de factores importantes que pueden afectar la eficiencia general del sistema de motores, aunque muchas veces no se les preste la atención necesaria. Entre ellos figuran: la calidad del suministro eléctrico (suministro eléctrico de alta calidad), la debida atención a los armónicos, el sobredimensionamiento del sistema (dimensionamiento correcto de los equipos), la red de distribución que alimenta el motor (atención al factor de potencia y a las pérdidas en la distribución), la transmisión y los componentes mecánicos (sistemas de transmisión optimizados), las prácticas de mantenimiento

(mantenimiento cuidadoso de todo el sistema de accionamiento) y la correspondencia entre la carga y el motor (buenas prácticas de gestión de las cargas). A continuación, examinaremos estos factores:

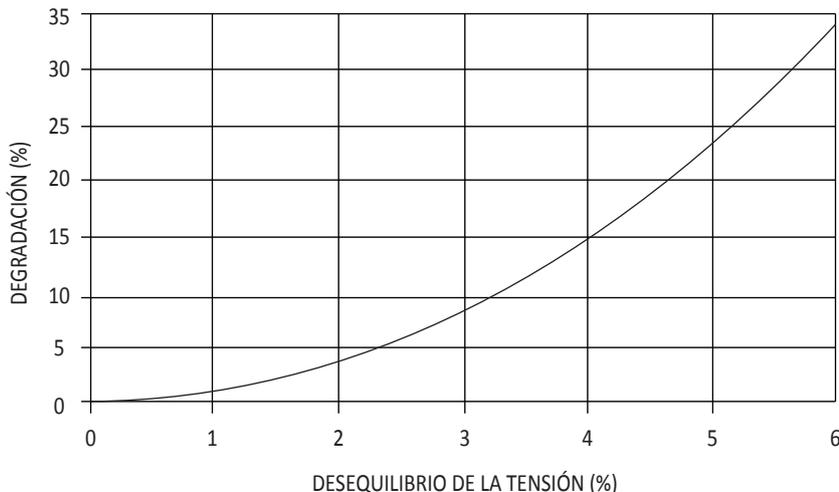
3.1 CALIDAD DEL SUMINISTRO ELÉCTRICO

Los motores eléctricos, y en particular los motores de inducción, están diseñados para funcionar con un rendimiento óptimo cuando se los alimenta con ondas sinusoidales trifásicas con el valor de la tensión nominal. Las desviaciones con respecto a estas condiciones ideales pueden causar un deterioro significativo de la eficiencia y de la vida útil del motor. Estas desviaciones son:

DESEQUILIBRIO DE LA TENSIÓN

El desequilibrio de la tensión provoca un gran desequilibrio de corriente que, a su vez, produce grandes pérdidas. Un desequilibrio de fase de sólo el 2% puede aumentar las pérdidas en un 25%. Además, un funcionamiento prolongado con una tensión desequilibrada puede dañar o destruir un motor (este es el motivo por el que muchos diseñadores incluyen una protección contra el desequilibrio de tensión y fallas de tensión en los arrancadores de motores). Otra consecuencia negativa de desequilibrio es la reducción del par motor.

Figura 17. Efecto del desequilibrio de la tensión nominal en la potencia del motor



SUBTENSIÓN O SOBRETENSIÓN

Cuando el motor marcha a plena carga (o casi), las fluctuaciones de tensión que excedan el 10% pueden disminuir la eficiencia del motor, el factor de potencia y la vida útil.

ARMÓNICOS

Bajo condiciones de funcionamiento ideales, las compañías de electricidad suministran ondas sinusoidales puras (60 Hz en el norte de Suramérica, incluida Colombia). Sin embargo, hay algunas cargas que pueden distorsionar la tensión, a saber: los variadores de velocidad y otros dispositivos de electrónica de potencia, los hornos de arco, los núcleos magnéticos saturados (transformadores, reactores),

televisores y computadores. La onda distorsionada resultante contiene una serie de ondas sinusoidales con frecuencias que son múltiplos de la frecuencia fundamental de 60 Hz: son los denominados armónicos.

Los armónicos aumentan las pérdidas y el ruido del motor; reducen el par, causan pulsación del par y sobrecalentamiento. La vibración y el calor pueden acortar la vida del motor, al dañar los rodamientos y el aislamiento. Los armónicos pueden provocar errores en los equipos electrónicos, incluidas las computadoras, pueden inducir inexactitudes en los medidores eléctricos. (un estudio patrocinado por el *Electric Power Research Institute* (EPRI) encontró errores de entre el +5,9% y el -0,8% en medidores afectados por armónicos provenientes de los VSD, producen estática de radiofrecuencia y destruyen los componentes del sistema de energía eléctrica.

3.2 RED DE DISTRIBUCIÓN

A través de la red distribución, entre la subestación y la carga, hay pérdidas importantes. Es posible reducir estas pérdidas si se seleccionan y usan correctamente transformadores eficientes, si se dimensionan los cables de distribución correctamente y si se corrige el factor de potencia. En las grandes industrias también es común usar la red de distribución de alta tensión para reducir las pérdidas.

TRANSFORMADORES

Los transformadores de distribución funcionan normalmente con una eficiencia por encima del 95%, a menos que sean viejos o que se los haga funcionar con muy poca carga. Es conveniente que se reemplacen los transformadores viejos e ineficientes por modelos nuevos más eficientes. Es más eficiente hacer funcionar un solo transformador a plena carga que dos transformadores con poca carga.

DIMENSIONAMIENTO DE LOS CABLES

Las corrientes con las que se alimentan los motores en todas las instalaciones producen pérdidas (del tipo I^2R) en los cables y transformadores de distribución del consumidor. El correcto dimensionamiento de los cables no solo va a permitir una minimización económicamente eficaz de las pérdidas, sino que también contribuye a que disminuya la caída de tensión entre el transformador y el motor. El uso de códigos nacionales normalizados para dimensionar los conductores logra que se usen cables de dimensiones que previenen el sobrecalentamiento y permiten la corriente de arranque los motores, pero es posible que estén lejos de un diseño energéticamente eficiente. Lo ideal sería que se eligiera el tamaño de los cables no solamente de acuerdo con los códigos nacionales, sino que también se tuvieran en cuenta el costo de la vida útil.

En general, en las nuevas instalaciones resulta económicamente eficaz instalar cables más grandes que los que el código exige, si los cables más grandes pueden instalarse sin aumentar el tamaño de la canalización, si el motor funciona a plena carga o a casi plena carga y si el sistema funciona muchas horas por año.

COMPENSACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

Un factor de potencia pobre significa pérdidas mayores en los cables y transformadores, menor capacidad de los transformadores, disyuntores y cables, y mayores caídas de tensión.

En el caso de los motores, el factor de potencia es máximo a plena carga, y disminuye junto con la carga.

Como se explicó en la sección 3.3, un motor sobredimensionado provocará una caída significativa del factor de potencia. Así pues, un motor del tamaño correcto mejorará el factor de potencia. Un factor de potencia bajo se puede corregir usando capacitores conectados al motor o al transformador de distribución. La compensación de la energía reactiva no solo reduce las pérdidas en la red, sino que también permite que se use a pleno la capacidad energética de los componentes del sistema de energía eléctrica. Además, se reducen las fluctuaciones de tensión, y se contribuye así a que el motor funcione a la tensión que más acerca a la tensión para la cual fue diseñado.

3.3 SOBREDIMENSIONAMIENTO DEL MOTOR

Los estudios sobre el uso de motores eléctricos en los países europeos destacaron que la carga de trabajo de la mayoría de los motores es muy inferior a la potencia nominal del motor. Se calculó que el factor de carga promedio de todos los sectores estudiados (alimentos, papel, productos químicos, cerámica, fundiciones y acero, y sector terciario) iba entre un 41% para los motores pequeños (por debajo de 4 kW) y un 51% para los motores por encima de 500 kW. En algunos sectores (alimentos, terciario) la carga de trabajo promedio es aún menor, con un mínimo de 24% para los motores más pequeños.

En el caso colombiano se ha establecido, de acuerdo al Plan de Acción Indicativo 2017-2022, que el 70% de los motores que se encuentran en funcionamiento lo hacen con una carga de 50% o menos.

Las razones por las cuales los diseñadores tienden a sobredimensionar los motores se deben sobre todo al deseo de mejorar:

- la fiabilidad del sistema.
- el par de arranque.
- la capacidad de ajustarse a requerimientos de potencia cada vez mayores.
- el margen para fluctuaciones de carga mayores.
- el funcionamiento en condiciones adversas (como desequilibrio de tensión o subtensión).
- el inventario de motores de repuesto.

3.3.1 LOS EFECTOS DEL SOBREDIMENSIONAMIENTO

La práctica general de sobredimensionar los motores viene a confirmar que, con frecuencia, la industria hace caso omiso del rendimiento energético (pérdidas mínimas en los motores y en las líneas de suministro). Los fabricantes de maquinaria, que son responsables de la elección del motor en el primer lugar, así como los usuarios, que deben influir en la etapa de la compra o del reemplazo de los motores dañados, deberían tener en cuenta que los criterios de diseño que producen sobredimensionamientos tienen consecuencias a la hora de pagar las facturas de energía.

Figura 18. Eficiencia del motor con respecto a la carga (5)

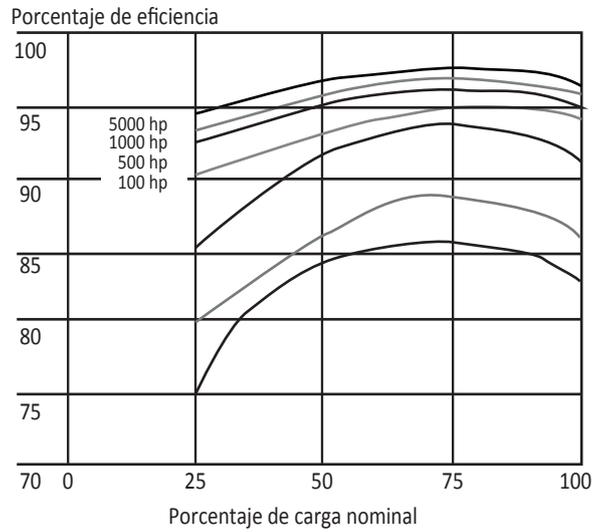
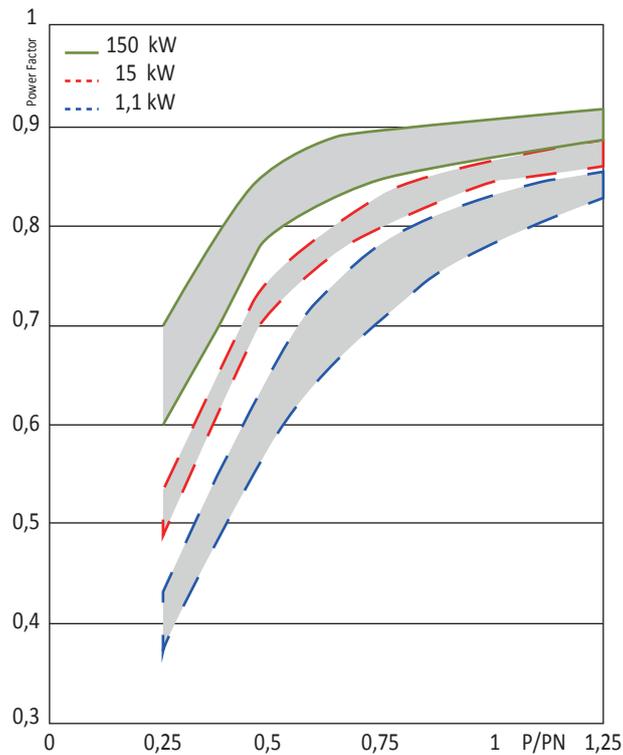


Figura 19. Factor de potencia con respecto a la carga



Cada vez que un motor tiene un punto de trabajo inferior al 100% de su potencia nominal, su eficiencia y su factor de potencia disminuyen y su costo de capital aumenta.

En la mayoría de los motores, la eficiencia es casi constante desde el 75% de la carga hasta plena carga, pero disminuye significativamente por debajo del 50% de la plena carga. Este efecto es más evidente en el caso de los motores pequeños. La figura 18 muestra la eficiencia en función del factor de carga de diferentes motores eléctricos.

La comparación de las características de la eficiencia energética de motores estándar y motores energéticamente eficientes (EEM) muestra que incluso los beneficios de usar un EEM pueden desperdiciarse si el factor de carga es anormalmente bajo.

Con frecuencia, no se tiene en cuenta el efecto adverso de la reducción del factor de potencia causado por el sobredimensionamiento. La figura 19 muestra el factor de potencia en función del factor de carga de los motores eléctricos.

A menos de que se compense la potencia reactiva de cada motor, las pérdidas en la línea causadas por el sobredimensionamiento pueden, en algunos casos, ser un factor clave para la selección del motor correcto.

3.3.2 PROCEDIMIENTO RECOMENDADO PARA SELECCIÓN DE MOTORES

Los y las especialistas en ingeniería eléctrica tienen acceso a los fundamentos técnicos y a las reglas prácticas para decidir el tamaño adecuado de un motor. A continuación, se expone un procedimiento detallado que tiene en cuenta todos los principales parámetros que tienen influencia sobre la optimización de la selección de un motor.

La aplicación del procedimiento muestra que las alternativas disponibles (tipos y tamaños de motores diferentes) para una aplicación pueden tener consecuencias significativamente distintas en términos de consumo de energía y de rentabilidad económica. Generalmente, se recomienda elegir un motor que trabaje con alto factor de carga, pero no se lo puede afirmar rotundamente. En primer lugar, las razones para sobredimensionar los sistemas de motores, como se indicó anteriormente, tienen sentido y hay que tenerlas en cuenta en cierta medida. En segundo lugar, las pérdidas y los costos asociados a una aplicación específica varían mucho dependiendo del tamaño y construcción del motor, ya que se relacionan con la carga y las características mecánicas del motor. En una serie de casos, la mejora de la eficiencia de los motores más grandes puede anteponerse a las pérdidas adicionales debidas a un factor de carga bajo.

Es por ello por lo que el diseño de aplicaciones nuevas para un motor o el cambio de un motor deberían basarse siempre en cálculos específicos. No habría que tomar decisiones a partir de reglas demasiado simples, porque pueden provocar inesperadamente un derroche de energía excesivo.

Los ahorros potenciales esperables, en términos de energía eléctrica, que puede obtenerse gratuitamente si dimensionamos el motor cuidadosamente, no son inferiores al 2% del consumo del motor.

En todo el mundo ya se han elaborado ayudas para cálculos muy efectivas, como **Motor Master Plus** y las calculadoras de MEASUR patrocinadas por la Oficina de Manufactura Avanzada del departamento de Energía de los EE. UU. **EURODEEM**, promocionada por la Comisión de la UE - DG XVII, y Motor Systems Tool desarrollado por el Instituto Tecnológico de Dinamarca para propósitos públicos, que es parte del programa de Investigación y Desarrollo **ELFORSK**, así como aplicaciones de esta naturaleza desarrolladas por fabricantes de motores y otros organismos gubernamentales. Estas herramientas han ampliado su finalidad mucho más allá de la fase de diseño, y proporcionan un enfoque amplio sobre cómo explotar eficientemente todas las aplicaciones de los motores de la fábrica. También varios de los proveedores más importantes de motores ponen a disposición de los usuarios, herramientas de software para la adecuada selección de motores eficientes y la evaluación de los beneficios a esta selección y su aplicación.

DEFINICIÓN DE LOS DATOS DEL TIPO Y DE LAS CARACTERÍSTICAS DE CARGA

Definiremos las siguientes características de carga:

- Tipo de carga (breve descripción de la máquina).
- Velocidad de rotación que la carga necesita en condiciones de trabajo usuales.
- Potencia o par (par constante, par cuadrático, par decreciente) requerido por la carga a la velocidad anterior.
- Momento de inercia de la carga.
- Características mecánicas (par-velocidad) de la carga; se recomiendan los valores de par al 75%, 50%, 25% de la velocidad nominal.
- Tiempo de arranque requerido por la carga.
- Par de arranque que se aplicará a la carga (se calcula a partir del tiempo de inicio, la inercia de la carga y la velocidad nominal).
- Relación entre el par de arranque y el par nominal.
- Sobrecargas previstas y su duración.
- Tipo de acoplamiento mecánico.
- Relación de transmisión de la velocidad r (eje de la carga/velocidad del eje del motor): esta relación puede determinar la selección de la cantidad de polos.
- Eficiencia del acoplamiento.

TRANSFERENCIA DE DATOS MECÁNICOS DE LA CARGA AL EJE DEL MOTOR

Los datos mecánicos deben transferirse del eje del motor vía la relación r definida anteriormente:

- Velocidad de rotación y momento de inercia.
- Potencia ajustada de acuerdo con las pérdidas de la transmisión.
- Par ajustado de acuerdo con la eficiencia de la transmisión y la relación de velocidad r .
- El tiempo de arranque es invariable.

EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL RÉGIMEN NOMINAL DEL MOTOR

Hay que evaluar preliminarmente las características del motor, para poder compararlas luego con los motores disponibles en el mercado (cantidad de polos, potencia):

- Velocidad y potencia nominales: se presume que serán iguales a los valores de la carga transferida al eje del motor.
- Frecuencia del suministro.
- Se supone que el deslizamiento nominal tiene el valor típico del de los motores con el rango de potencia requerido.
- La velocidad síncrona y la cantidad de polos se calculan en consecuencia.
- Si la cantidad de pares de polos está cerca de un entero, se puede seleccionar el motor mediante las fichas técnicas de los fabricantes; de no ser así hay que ajustar la relación de velocidad r hasta que se obtenga una cantidad de pares de polos enteros.

SELECCIÓN DEL MOTOR A PARTIR DE LAS FICHAS TÉCNICAS DE LOS FABRICANTES

Hay que examinar las fichas técnicas de los fabricantes para encontrar un motor que tenga las características que más se acerquen a nuestros cálculos preliminares.

Si se buscan márgenes de seguridad más amplios, el proceso puede repetirse seleccionando motores de mayor rendimiento. El procedimiento es el siguiente:

- Se establece la cantidad de pares de polos según el valor que surja de los cálculos preliminares.
- El motor con la potencia nominal cercana a la calculada y con la característica de par (relaciones par máximo-par nominal y par de arranque-par nominal) que se ajusta a los requisitos de la aplicación.
- La velocidad y el deslizamiento nominales del motor se encuentran en la ficha técnica.
- Los datos de par del motor, como par máximo y de arranque se encuentran en la ficha técnica y se deberá verificar que sean consistentes con las condiciones de funcionamiento (tiempo de arranque, capacidad de sobrecarga) y con el par nominal.
- Generalmente, el fabricante también nos da los valores del par para cargas diferentes, que es la característica mecánica del motor.
- Los valores de la eficiencia y del factor de potencia nominales deberán determinarse en consecuencia.

IDENTIFICACIÓN DEL PUNTO DE TRABAJO COMO INTERSECCIÓN ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA Y DEL MOTOR

Una vez que se seleccionó el motor, hay que seguir el siguiente procedimiento:

- Se deberá determinar el punto de trabajo (par y velocidad): se puede hacer gráficamente (graficando las características de par-velocidad del motor y de la carga), o analíticamente (linealizando las dos características en las cercanías del punto de trabajo).

Después se calculan los siguientes parámetros en el punto de trabajo:

- Velocidad y deslizamiento.
- Potencia de salida del motor.
- Factor de carga (relación entre la potencia de salida y la potencia nominal de salida).
- Eficiencia del motor, ya sea teniendo en cuenta los datos de los fabricantes o los datos promedio relevantes para una carga equivalente al 100%, 75%, 50%, 25% de la potencia nominal.
- Potencia de entrada del motor (relación entre la potencia de salida y la eficiencia).
- Factor de potencia.
- Pérdidas del motor.
- Pérdidas en la línea.

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA ELECCIÓN ENTRE DISTINTOS MOTORES

La evaluación debería hacerse comparando la eficiencia en términos de los costos para cada solución alternativa, considerando tanto el costo de los motores como los ahorros anuales previstos en la factura de energía.

3.4 SISTEMA DE TRANSMISIÓN

El sistema de transmisión transfiere potencia mecánica desde el motor hasta el uso final. La elección de la transmisión depende de muchos factores, a saber: relación de la velocidad deseada,

potencia del motor, disposición de los ejes, tipo de carga mecánica, etc. Los tipos de transmisión disponibles más importantes son los acoples al eje de transmisión directos, las cajas de engranajes, las cadenas y las correas.

CORREAS

La mayoría de los motores se conectan a las cargas mediante sistemas de transmisión, muy frecuentemente mediante una correa. Aproximadamente un tercio de las transmisiones de los motores industriales usan correas. Las correas brindan flexibilidad en la ubicación del motor con respecto a la carga. Además, las correas pueden aumentar o disminuir las velocidades usando poleas de diámetros adecuados.

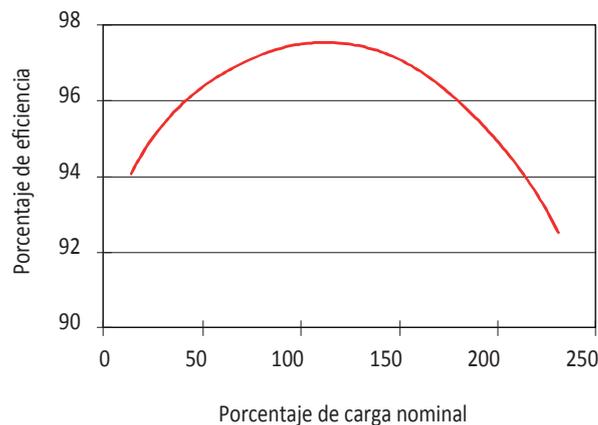
Hay distintos tipos de correas, a saber: correas trapezoidales, correas trapezoidales dentadas, correas sincronas y correas planas. Las correas trapezoidales son las más baratas y el tipo más común, pero los otros tipos de correas pueden ofrecer mayor eficiencia (cuadro 1).

Cuadro 1. Comparación de las características de las correas de transmisión [7]

| | Rango típico de eficiencia (%) | Adecuadas para cargas de choque | Mantenimiento periódico requerido | Cambio de poleas requerido | Características especiales |
|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|---|
| Correas trapezoidales | 90-98 | Sí | Sí | No | Bajo costo inicial |
| Correas trapezoidales dentadas | 95-98 | Sí | Sí | No | Retrofit sencillo. Menor deslizamiento. |
| Correas sincronas | 97-99 | No | No | Sí, a un costo mayor | Aplicaciones de velocidad baja y media. Sin deslizamiento. Ruidosa. |

Las pérdidas de las correas trapezoidales están asociadas con el hecho de que se doblan cuatro veces por ciclo y con el hecho de que resbalan, y un pequeño porcentaje de las pérdidas se debe a la resistencia al viento. Con el uso, las correas trapezoidales se van estirando y hay que volverlas a tensar. También se van alisando con el uso y es más probable que resbalen. Así pues, las correas trapezoidales necesitan mantenimiento periódico, lo que es una desventaja en relación con otros tipos de correas que no se estiran. Además, la eficiencia disminuirá si la carga está por encima o por debajo de la plena carga (véase la figura 20).

Figura 20. Curva de eficiencia de una correa trapezoidal [8]



Las correas trapecoidales dentadas tienen menos pérdidas por flexión, dado que se requiere menos tensión para doblar la correa y de esta manera son, por lo general, entre una y cuatro veces más eficientes que las correas trapecoidales corrientes. Pueden usarse en las mismas roldanas y poleas que las correas trapecoidales corrientes, duran el doble y hay que ajustarlas con menos frecuencia. Con correas trapecoidales dentadas, se obtiene más eficiencia cuando se usan poleas pequeñas. Las correas trapecoidales dentadas cuestan entre un 20% y un 30% más que las correas trapecoidales corrientes, pero ese costo extra se recupera en unos pocos miles de horas de funcionamiento.

El diseño de correa más eficiente es el diseño síncrono, que tiene una eficiencia del 97-99%, ya que tiene pérdidas por flexión bajas y no resbala. Las correas síncronas no resbalan porque tienen dientes en la correa y en las poleas. A diferencia de las correas trapecoidales que dependen de la fricción entre la correa y las gargantas de las poleas para transmitir el par, las correas síncronas están diseñados para que haya una fricción mínima entre la correa y la polea. Debido a su accionamiento positivo, estas correas pueden usarse en aplicaciones que requieren un control de la velocidad preciso. Las correas síncronas se estiran muy poco debido a su construcción, no es necesario tensarlas periódicamente y, por lo general, duran cuatro veces más que las correas trapecoidales comunes. La readaptación de correas síncrona exige que se instalen piñones que cuestan varias veces más que el precio de la correa. En los casos en que el reemplazo de las poleas no sea práctico ni eficaz en función del costo, se recomienda usar correas trapecoidales dentadas.

ENGRANAJES

La selección de una transmisión por engranajes eficiente puede generar ahorros energéticos importantes. Las características nominales de las transmisiones por engranajes dependen la relación de multiplicación (relación entre la velocidad del eje de entrada y la velocidad del eje de salida) y del par necesario para impulsar la carga.

En las transmisiones de motores podemos usar varios tipos de engranajes, a saber: helicoidales, cilíndricos, cónicos y sinfín-corona. Los engranajes helicoidales y cónicos son los más usados y su eficiencia puede alcanzar el 98% por etapa (cada paso de reducción o aumento de la velocidad del eje). Los engranajes cilíndricos se usan con la misma finalidad que los engranajes helicoidales pero son menos eficientes, de manera que no habría que usarlos en las aplicaciones nuevas. Los engranajes sinfín-corona permiten que se logre una relación de reducción muy grande (5:1 -70:1) en una sola etapa. Su eficiencia oscila entre el 55% y el 94% y cae rápidamente a medida que aumenta la relación de reducción. Así pues, siempre que sea posible, conviene reemplazar los engranajes sinfín-corona por otros engranajes más eficientes, como los engranajes helicoidales.

CADENAS

A diferencia de las correas, las cadenas se usan, por lo general, en aplicaciones de velocidad baja y par grande. Al igual que en el caso de las correas síncronas, las cadenas no resbalan. Una cadena bien mantenida puede tener una eficiencia del 98%, pero el desgaste puede hacer que la eficiencia disminuya algunos pocos puntos.

A excepción de las cadenas silenciosas, las cadenas son ruidosas. A las cadenas hay que reajustarlas y lubricarlas adecuadamente, lo que no siempre es fácil. Así pues, el uso de correas síncronas pareciera ser una alternativa al uso de cadenas.

3.5 PRÁCTICAS DE FUNCIONAMIENTO Y MANTENIMIENTO

El mantenimiento periódico (como inspecciones, limpieza, lubricación, afilado de herramientas) es esencial para mantener el máximo rendimiento de las piezas mecánicas y para extender vida útil operativa (6).

LUBRICACIÓN

Un mantenimiento periódico con la frecuencia correcta es necesario para reducir al mínimo la fricción de los rodamientos. La fricción de los rodamientos desperdicia energía, aumenta la temperatura de marcha del motor y disminuye la vida útil del motor y del lubricante. La lubricación en defecto y en exceso pueden producir pérdidas por fricción y acortan la vida útil de los rodamientos. Además, si se engrasa de más es posible que se acumule grasa y suciedad en los devanados del motor, lo que provocará sobrecalentamiento y fallas prematuras. El uso de lubricantes sintéticos puede contribuir a que se reduzcan sustancialmente las pérdidas por fricción.

VERIFICACIONES PERIÓDICAS

Se recomienda que se verifique periódicamente la temperatura y el estado eléctrico y mecánico del motor. Además, la eficiencia mecánica del equipo de uso final (ventilador, bomba, telares, etc.) afecta directamente la eficiencia general del sistema. Es especialmente importante hacer un seguimiento del desgaste y la erosión del equipo de uso final ya que pueden afectar su eficiencia drásticamente. Por ejemplo, la erosión del rodete de la bomba hará que la eficiencia de la bomba descienda bruscamente.

En general, las instalaciones con buenos programas de mantenimiento inspeccionan los sistemas impulsados por motores cada seis meses.

CONDICIONES DE LIMPIEZA Y MEDIOAMBIENTALES

También es importante limpiar la carcasa del motor (en las industrias con polvo, es necesario hacerlo con frecuencia) porque la temperatura de funcionamiento de los motores aumenta a medida que el polvo y la suciedad se van acumulando sobre la carcasa. Lo mismo puede decirse con respecto a la necesidad de darle al motor un ambiente fresco. Los aumentos de temperatura provocan un aumento en la resistividad de los devanados y, por lo tanto, mayores pérdidas. Un aumento de la temperatura del motor de 25°K produce un aumento del efecto de Joule del 10%.

PUESTA EN SERVICIO

La instalación y puesta en marcha correctas del sistema de motores son muy importantes para garantizar su eficiencia óptima y una vida útil máxima. Especialmente en las instalaciones grandes, vale la pena que un servicio externo verifique minuciosamente todo el sistema de motores y verifique el cumplimiento satisfactorio de las especificaciones relevantes (eléctricas y mecánicas).

3.6 GESTIÓN Y ALTERNANCIA EN CICLOS DE LAS CARGAS

Mediante el uso de sistemas de motores energéticamente eficientes se puede lograr no solamente ahorros energéticos, sino también que la demanda se reduzca. Especialmente en el caso de grandes inversiones, al evaluar la relación costo-eficacia de las inversiones de conservación de la energía, conviene tener en cuenta los beneficios económicos de una reducción de la demanda. Además, para reducir aún más la demanda de energía eléctrica durante los períodos pico, y con el objetivo de gestionar las cargas, es posible alternar en ciclos y programar los motores. Las cargas que por lo general van a beneficiarse de la alternancia en ciclos son las cargas con grandes constantes de tiempo. Dentro de estas cargas encontramos los equipos de refrigeración y de aire acondicionado, las bombas de calor y otras cargas reducibles.

4

VARIADORES DE VELOCIDAD (VSD)

Un variador de velocidad es un sistema electrónico diseñado para controlar la velocidad del eje de un motor, variando la frecuencia y la tensión que se aplica a los devanados estáticos, con el fin de que se cumplan los requisitos de velocidad o de par de la aplicación.

Los VSD tienen muchos usos posibles en los accionamientos eléctricos. En el sector industrial es posible identificar algunas funciones típicas que abarcan la mayoría de estas aplicaciones de los motores. Por ejemplo, robótica, máquinas-herramienta, manipulación de materiales, máquinas para procesos pequeñas y medianas, compresores, bombas centrífugas, ventiladores, etc. En el cuadro 2 observamos los rangos de potencia típicos de estas aplicaciones.

Normalmente, los VSD eléctricos integran sistemas de mayor o menor complejidad. Dependiendo de la máquina que impulsan, es posible:

- Controlar la velocidad (angular o lineal), el par, la posición, la aceleración o el frenado.
- Optimizar el consumo de energía o de materiales, siempre que haya un sensor adecuado y que se pueda definir el algoritmo de control.
- Combinar varias máquinas y controlar sus velocidades coordinadamente.
- Establecer comunicaciones entre sistemas distintos o entre niveles de jerarquía distintos dentro de un sistema. El variador y la máquina se consideran como una unidad dentro de una estructura que agrupa todo el proceso.

Cuadro 2. Ubicación por potencia de las aplicaciones industriales típicas

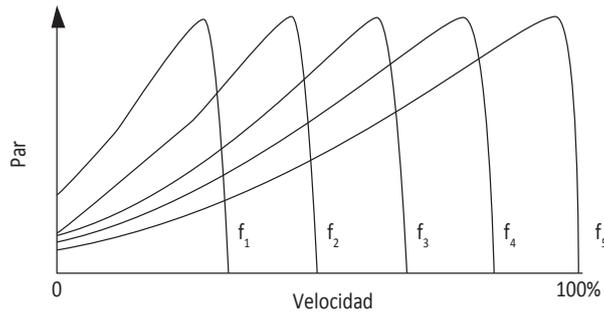
| Aplicación | P<10 kW | 10<P<50 kW | 50<P<500 kW | P>500 kW |
|--|---------|------------|-------------|----------|
| Robótica | | | | |
| Máquinas herramientas | | | | |
| Manipulación de materiales | | | | |
| Máquinas para procesos pequeñas y medianas | | | | |
| Máquinas grandes (por ejemplo, molinos o compresores) | | | | |
| Máquinas centrifugadoras (con exclusión de las máquinas grandes) | | | | |
| Reemplazo de motores térmicos | | | | |

Las posibilidades que presentan los VSD aumentan con la integración de sistemas de producción computarizados.

La velocidad del campo de rotación creado por los devanados estáticos de los motores de inducción se vincula directamente con la frecuencia de la tensión aplicada a los devanados. Los variadores de velocidad electrónicos pueden producir frecuencias variables y ondas de tensión variables. Si estas ondas se aplican a los devanados estáticos, la curva par-velocidad variará, manteniendo el par de

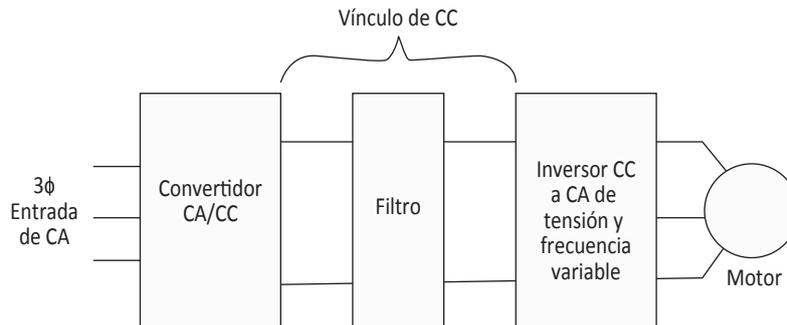
desenganche constante, y la misma pendiente en la región de funcionamiento lineal de la curva. De esta manera, la velocidad del motor va a ser proporcional a la frecuencia aplicada generada por el VSD (figura 21).

Figura 21. Curvas de velocidad-par de un motor de inducción ($f_1 < f_2 < f_3 < f_4 < f_5$ y $f_5 = 50$ Hz).



La figura 22 muestra la configuración general de la mayoría de los VSD. Al principio, se convierte el suministro de corriente alterna (CA) de 60 Hz trifásica a corriente continua (CC), después se lo filtra y, finalmente, los convertidores inversores de CC/CA convierten la tensión de CC en las tensiones variables y en las frecuencias variables de salida que se aplican al motor.

Figura 22. Configuración general de los VSD basados en inversores



El ajuste de la velocidad del motor por medio de un VSD puede ayudar a controlar mejor los procesos, a disminuir el desgaste mecánico de los equipos y el ruido acústico y puede generar ahorros energéticos significativos. Sin embargo, los VSD pueden tener algunas desventajas, tales como generación de interferencia electromagnética (EMI), introducción de armónicos en el suministro y, si el motor es viejo, es posible se reduzcan la eficiencia y la vida útil.

El cuadro 3 presenta una visión general de las tecnologías impulsadas con CA controlada, y muestra cinco formas básicas de variadores de velocidad electrónicos.

Cuadro 3. Visión general de los VSD electrónicos

| Tipo de VSD | Características principales | |
|--|--|--|
| | Ventajas | Desventajas |
| Modulación por ancho de impulso (PWM) | Buen factor de potencia en todo el rango de velocidad. Baja distorsión de la corriente del motor. Amplio rango de velocidad (100:1). Con capacidad para varios motores. | Limitado a VSD por debajo de 1 MW. Ligeramente (aprox. 1%) menos eficiente que VSI o CSI. Circuito básico sin capacidad de regeneración. |
| Inversor con fuente de tensión de seis pasos (VSI) | Buena eficiencia. Configuración del circuito sencilla. Amplio rango de velocidad (10-200%). Con capacidad para varios motores. | Factor de potencia pobre para bajas velocidades (a menos que se use un rectificador/interruptor chopper convertidor CA/CC). Sin capacidad de regeneración. El funcionamiento por debajo del 10% de la velocidad nominal puede producir par de detención. |
| Exige inversor con fuente de corriente conmutada (CSI) | Diseño de circuito simple y robusto Capacidad regenerativa. Protección contra cortocircuitos integrada. Amplio rango de velocidad (10-150%). | Voluminoso. Factor de potencia pobre a velocidad o carga bajas. Posible par de detención por debajo del 10% de la velocidad nominal. |
| Inversor de carga conmutada (LCI) | Diseño de circuito simple y económico. Capacidad de regeneración. Protección de cortocircuitos integrada. | Factor de potencia pobre a velocidad baja. Sólo se puede utilizar con motores síncronos. |
| Cicloconvertidores | Puede funcionar hasta con velocidad cero. Alta capacidad de par con control de campo orientado. Puede usarse con motores de inducción y síncronos. | No se puede utilizar por arriba del 33% de la frecuencia de entrada. Diseño de circuito complejo. Factor de potencia pobre a velocidad baja. |

Los criterios de selección de un VSD requieren que se conozcan algunos datos básicos, por ejemplo, potencia requerida, tensión de alimentación, requisitos de par y velocidad, rangos de velocidad y precisión de la velocidad. Un VSD tiene que ser capaz de:

- Hacer arrancar la carga que controla.
- Impulsar esa carga de acuerdo con los requisitos de funcionamiento.
- Parar esa carga de conformidad con los criterios vinculados con el modo operativo.

Para cumplir estas tres funciones, comunes a todas las aplicaciones, es posible que haya que agregar el posicionamiento o la sincronización con otros dispositivos del sistema.

Para hacer **arrancar** una carga, el par electromagnético del motor debe ser mayor que el total del par resistivo. La diferencia determina el par de aceleración, que es una función de la inercia total del sistema y del tiempo de aceleración requerido. El cuadro 4 muestra algunos ejemplos de requisitos de arranque vinculados con las aplicaciones habituales y ofrece posibles soluciones.

Normalmente, la productividad aumenta con la velocidad. Si la carga varía poco durante el ciclo de producción, la calidad aumenta con la precisión del estado estacionario. La precisión dinámica es relevante si el ciclo de carga varía significativamente y si hay muchas variaciones en la referencia del par. A menudo, las mejoras del rendimiento debidas al uso de los VSD se ven limitadas por la calidad de la transmisión en la línea del eje (juego, elasticidad, flexión, torsión, etc.) Una de las características de los VSD es que el variador puede ponerse tan cerca como sea posible de la aplicación. Por lo tanto, es posible reducir al mínimo los problemas vinculados con los acoplamientos y las transmisiones (juego, elasticidad, velocidades críticas).

En aplicaciones que requieren un rango de velocidad amplio o un control de velocidad preciso, la técnica más apropiada consiste en usar variadores de velocidad electrónicos (VSD) (7). Los VSD pueden ajustar la velocidad del motor a los requisitos de carga. Las cargas impulsadas por motores se pueden clasificar en tres grupos principales, de acuerdo a si el par aumenta, si permanece constante, o si disminuye con el aumento de la velocidad (figura 23). La potencia mecánica es igual al producto del par por la velocidad angular. En bombas y ventiladores centrífugos (cargas de par cuadrático) la potencia requerida varía aproximadamente con la velocidad del motor al cubo. Esto significa que, en un sistema de ventiladores, para mover el 80% del flujo nominal, solo se necesita aproximadamente la mitad de la potencia total.

Cuadro 4. Ejemplos de requisitos de arranque vinculados con ciertos tipos de aplicaciones típicas y soluciones posibles.

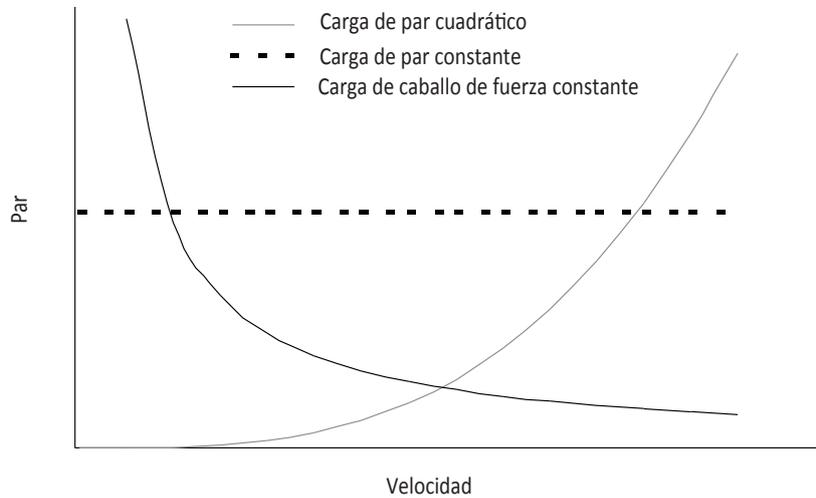
| ARRANQUE | | |
|--|---|--|
| Requisitos | Aplicaciones típicas | Soluciones posibles |
| Limitar los choques mecánicos | Cintas transportadoras, escaleras mecánicas, cintas transportadoras para productos frágiles | Rampa de velocidad |
| Eliminar el juego | Engranajes, línea de manipulación de la transmisión | Rampa parabólica o en forma de S |
| Máquina de alta inercia | Centrifugadora | Motor con par de arranque alto |
| Máquina con par resistivo alto | Trituradoras, amoladoras | |
| Carga con par de accionamiento | Ascensor | Sistema funcionando en dos o cuatro cuadrantes |
| Arranques frecuentes en un tiempo dado | Máquina de manipulación | Clasificación térmica apropiada |
| Dentro de un límite de tiempo | Extractor de humo centrífugo | Rampa de velocidad |
| Dentro de un límite de tiempo y de espacio | Remontes de esquí | Control de aceleración especial |

En términos de respuesta, las bombas y los ventiladores controlados por VSD pueden responder a condiciones cambiantes más rápido y con más fiabilidad que las válvulas o los amortiguadores. Esto es especialmente cierto en los extremos del rango de flujo, cuando las válvulas se comportan muy no-lineales, aun cuando estén equipadas con ajustes de linealización.

En el caso de cargas para las cuales la potencia consumida depende del cubo de la velocidad (ley del cubo), por ejemplo, ventiladores y bombas centrífugas, es posible obtener reducciones de consumo significativas en comparación con lo que se puede lograr con el control de flujo mediante válvulas reguladoras. Los variadores de velocidad también pueden hacer que los motores de inducción funcionen más rápido que sus rangos de velocidad máxima normal, con la condición de que los rotores puedan soportar altas velocidades de funcionamiento. Por lo tanto, los variadores de velocidad tienen el potencial necesario para ampliar el rango de funcionamiento de los compresores, las bombas y los ventiladores. En el caso de muchas aplicaciones (como los ventiladores de tiro forzado) que tienen límites impuestos por la capacidad del ventilador o de la bomba, es posible que mejoren sus capacidades en todos los sentidos si seleccionamos correctamente el variador de velocidad y el motor.

Además, el VSD aísla el motor de la línea, lo que permite que se reduzca el stress del motor y la ineficiencia causada por las variaciones en la tensión de línea, el desequilibrio de fase y las ondas de tensión de entrada pobres. En algunas aplicaciones, los VSD pueden impulsar varios motores simultáneamente, como en muchos procesos de hilados. Por ejemplo, un solo PWM-VSD de 100 kW puede usarse para impulsar dos motores de inducción de 50 kW a exactamente la misma frecuencia. Este enfoque puede generar ahorros de costos significativos.

Figura 23. Tipos de curvas de par-velocidad: Carga de par cuadrático (p. ej., ventiladores y bombas centrífugas); carga de par constante (p. ej., cintas transportadoras, bombas de desplazamiento positivo); carga de caballo de fuerza constante (p. ej., tracción, devanadoras, molinos laminadores)



Para **parar** el sistema se pueden usar distintos métodos, según el rendimiento que la aplicación requiera. El cuadro 5 resume los aspectos principales relacionados con operación de parada. El problema de la parada se vincula con el posicionamiento.

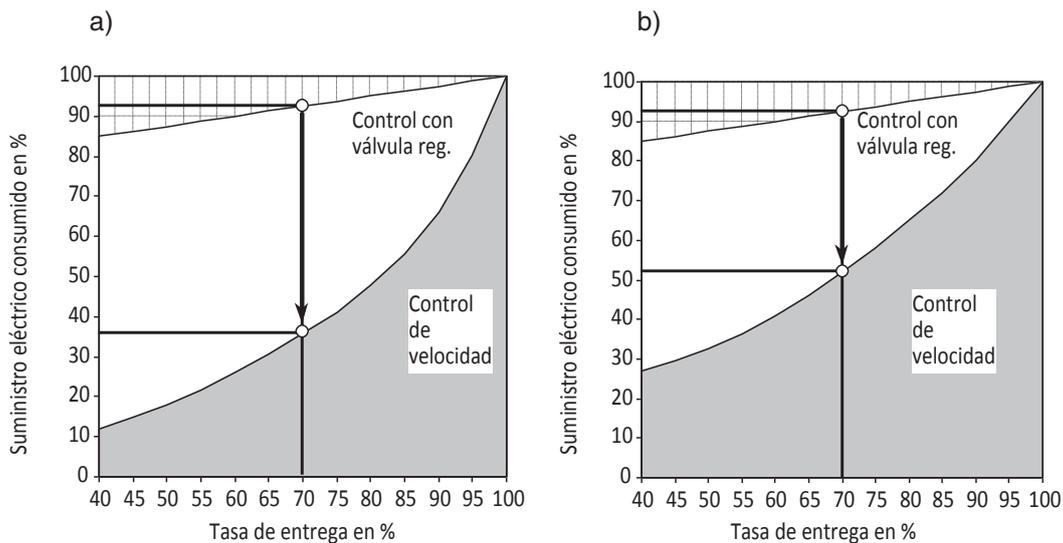
Cuadro 5. Aspectos principales relacionados con la operación de parada de un VSD.

| PARADA | | |
|---|---|--|
| Requisitos | Aplicaciones típicas | Soluciones posibles |
| Parada simple | Ventiladores | Rueda libre o freno mecánico |
| Limitar los choques mecánicos | Transmisión de las cintas transportadoras | Rampa de desaceleración, limitación de par |
| Eliminación del juego | Sistema que incorpora engranajes | Rampa de desaceleración parabólica |
| Poco tiempo | Parada de emergencia de centrifugadoras | Rampa de velocidad, inyección de CC |
| Carga con par de accionamiento | Ascensores, elevadoras | Marcha atrás |
| Frenado eléctrico sin calentamiento del motor, con o sin regeneración | Molinos laminadores, tracción eléctrica | Frenado reostático o regenerativo |

4.1 BOMBAS

Bomba única - Las bombas centrífugas sin elevación (p. ej., con circuito cerrado) respetan la ley del cubo, es decir, que el consumo de energía eléctrica es proporcional a la velocidad al cubo, como se puede ver en la figura 24 a. Si el usuario quiere reducir el flujo del proceso, puede usar una válvula de control, o alternativamente, puede controlar la velocidad usando un VSD. A pesar de que ambas técnicas alcanzan el objetivo deseado, el consumo de energía es significativamente superior cuando se controla con válvula reguladora. Si el sistema tiene una altura para dar elevación al fluido del sistema de bombeo, las bombas tienen que superar la presión estática correspondiente, como se muestra en la figura 24 b.

Figura 24. Energía eléctrica de entrada de una bomba con válvula reguladora con respecto a una bomba con control de velocidad: a) sin altura de presión estática (p. ej., sistemas de recirculación); b) con altura de presión estática.



En estos sistemas de bombeo, la energía mecánica se utiliza para superar la fricción en las tuberías más el trabajo mecánico asociado con elevar el fluido contra la gravedad, como se muestra en la figura 25.

Si el porcentaje de la energía eléctrica necesaria para superar la fricción en las tuberías es relevante, igual es posible lograr ahorros energéticos, aunque por lo general, serán menores que en los sistemas sin altura de presión estática.

La eficiencia general de los sistemas de bombeo depende de la eficiencia de los distintos componentes del sistema. La figura 26 muestra un ejemplo de la energía eléctrica absorbida por un sistema de bombeo sin otros componentes. Para un uso final con la misma potencia, el sistema ineficiente absorbe más del doble de energía eléctrica que el sistema optimizado.

Figura 25. Resistencia del sistema total proveniente de las pérdidas por fricción más las pérdidas por altura estática.

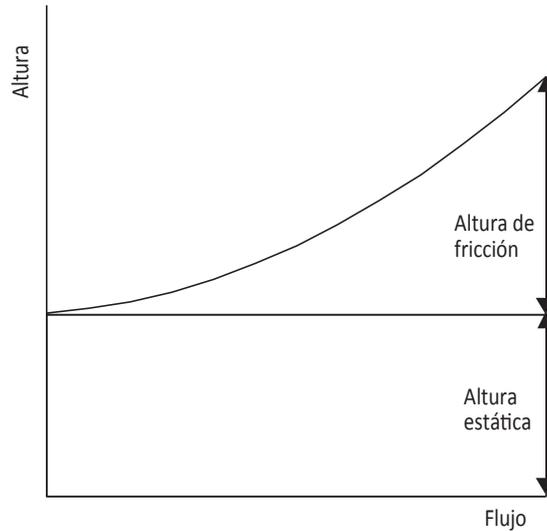
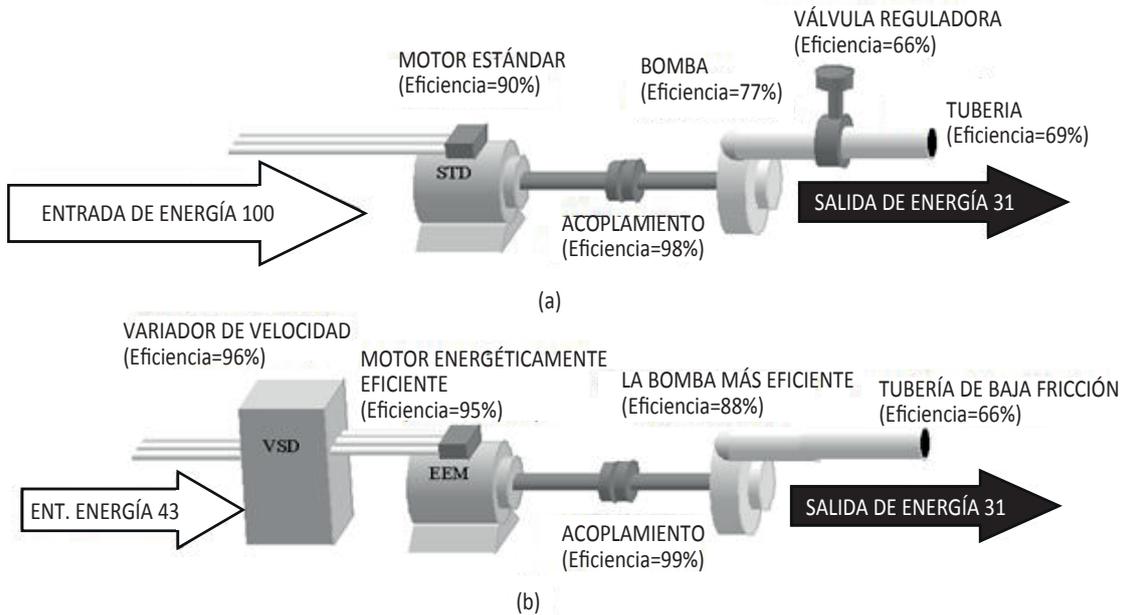


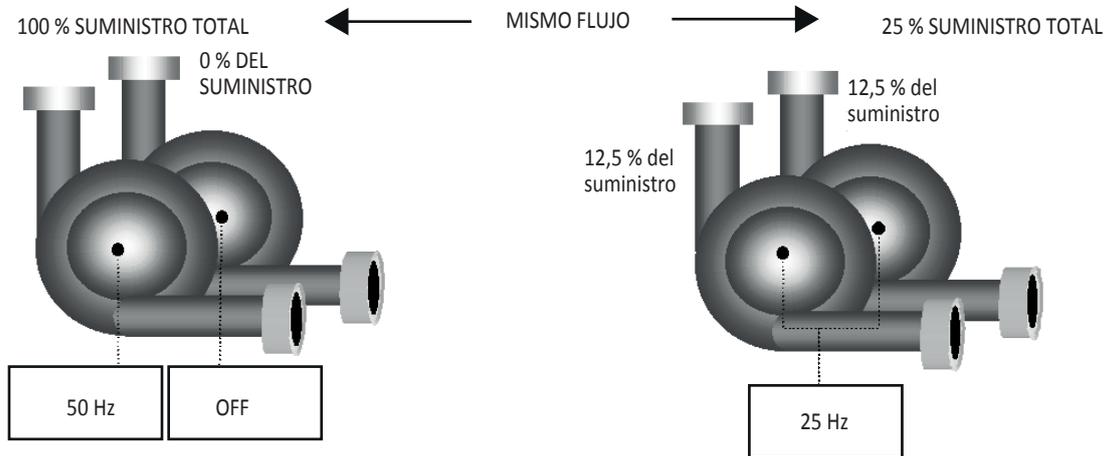
Figura 26. Dos sistemas de bombeo con la misma salida: a) Sistema convencional (Eficiencia total = 31%); b) Sistema de bombeo energéticamente eficiente combinado con tecnologías eficientes (Eficiencia total = 72%).



Planta de bombeo por etapas - en muchas de las aplicaciones, se usan varias bombas en paralelo para producir el flujo requerido. Si se hacen funcionar las bombas a menor velocidad, en lugar de que alternen en ciclos de arranque y apagado de acuerdo con la demanda, se pueden lograr ahorros energéticos significativos. Por ejemplo, en un sistema de dos bombas con altura estática baja y circuitos de bombeo independientes, para hacer funcionar las dos bombas al 50% del flujo nominal se necesita aproximadamente el 25% de la energía eléctrica necesaria para que una sola bomba

funcione al 100%. Otras ventajas son que las bombas siempre están tibias (no hay condensación en los devanados), las juntas se mantienen secas y en buen estado, y además, se eliminan los choques de los arranques sobre el sistema. La figura 27 ilustra esta situación. También es posible controlar los “golpes de ariete” que degradan las tuberías controlando la aceleración y la desaceleración por medio de variadores de velocidad.

Figura 27. Planta de bombeo: Relación que conviene tener en cuenta con sistemas independientes de circuito cerrado en los que la “altura” no es un factor importante.

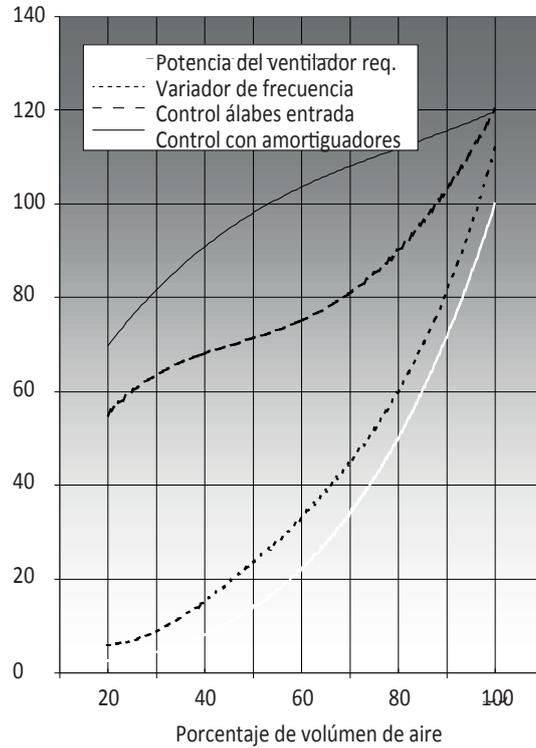


4.2 VENTILADORES

Los ahorros provenientes de agregar un control de velocidad variable a los ventiladores pueden ser significativos, aun en el caso de motores de carga bastante alta. La figura 28 muestra el potencial de ahorros con un VSD con respecto a los métodos comunes de regulación.

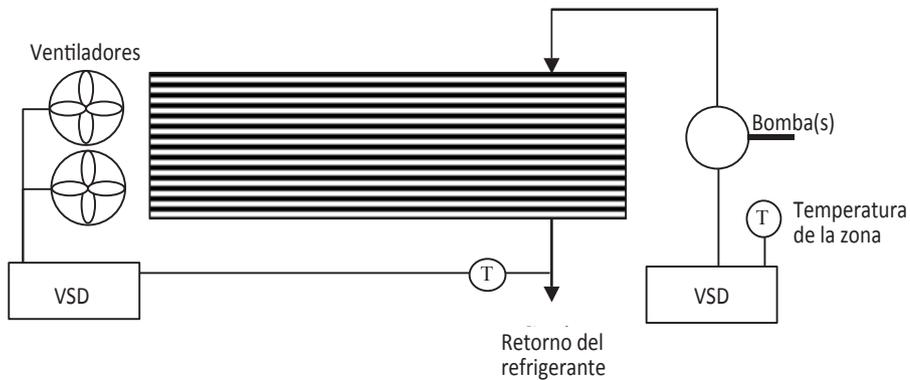
Se desperdician cantidades muy altas de energía al regular el flujo de aire en lugar de usar velocidades ajustables. El peor de los métodos son los amortiguadores en la salida, seguidos por el control de los álabes de entrada. Para un flujo del 50%, un VSD puede ahorrar entre el 68% y el 80% de la energía eléctrica consumida, en comparación con el control de los álabes y con los amortiguadores, respectivamente. Por ejemplo, un motor de 100 kW que impulsa una carga regulada continuamente al 50% de su producción generará ahorros de casi 18 000 euros anuales (suponiendo 0,06 euros/kWh, 6000 horas por año). El consumo de energía de estas cargas es tan sensible a la velocidad que el usuario puede lograr ahorros significativos incluso con los ajustes de velocidad más modestos.

Figura 28. Consumo de energía eléctrica relativa para distintos métodos de control del flujo.



Ejemplo: en un sistema de enfriador de techo (figura 29), se puede usar un VSD para modular la velocidad de la bomba sobre la base del control de la temperatura de la zona y/o para controlar la velocidad del ventilador sobre la base de la temperatura de retorno del refrigerante. El resultado, comparado con un control de la alternancia en ciclos de arranque/apagado, es una temperatura constante en el espacio controlado que permite un funcionamiento más eficiente.

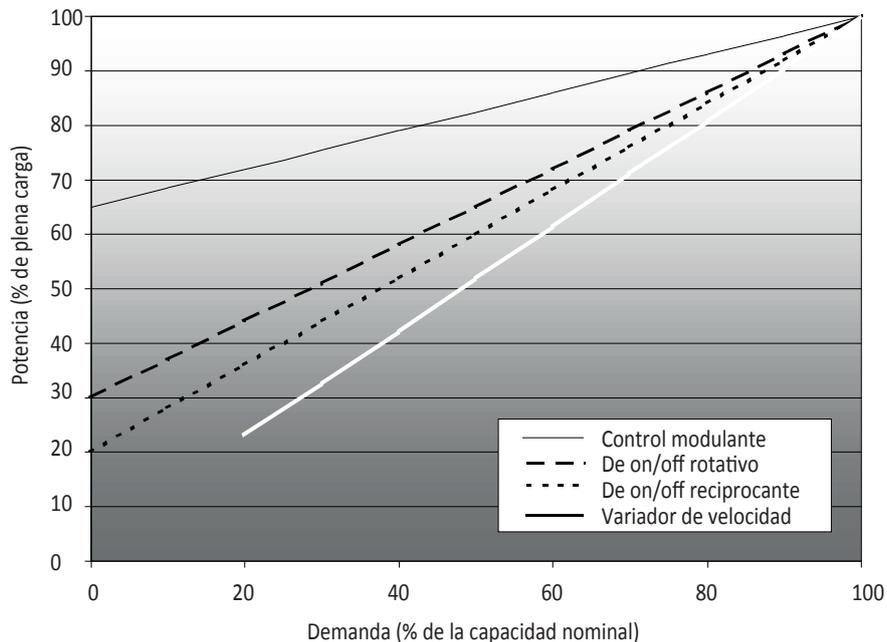
Figura 29. Enfriador de techo.



4.3 COMPRESORES

Los compresores de aire de tornillo rotativo y de pistón son básicamente cargas de par constante y, por lo tanto, pueden beneficiarse si se les aplica un variador de velocidad. Los ahorros relacionados con el uso de variadores de velocidad dependen del sistema de control que se reemplace. En la figura 30, se pueden observar los ahorros energéticos logrados al instalar un VSD a una unidad de aire comprimido de tornillo rotativo, comparados con otros métodos de control de flujo a carga parcial. En un compresor con control por modulación, si la demanda es del 50% de la capacidad nominal, al integrar un VSD se pueden obtener ahorros de aproximadamente 38%.

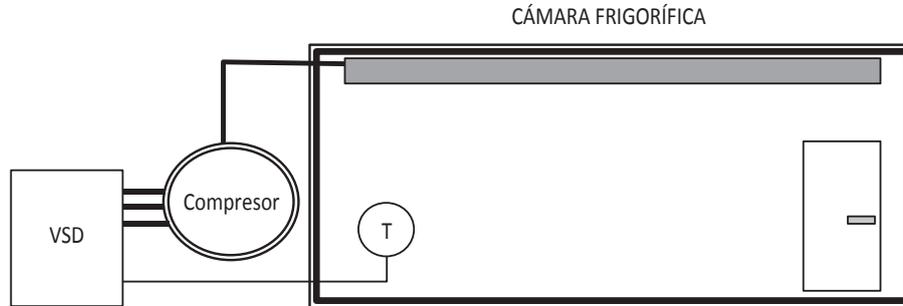
Figura 30. Energía ahorrada al usar un VSD en un compresor de aire de tornillo rotativo.



Los ahorros energéticos en las cargas de par constante son, por lo general, considerablemente menores que en los casos de bombas o ventiladores centrífugos (que obedecen a la ley del cubo). Es así como es probable que, desde el punto de vista económico, si miramos solamente los ahorros energéticos, no convenga tanto agregarle un VSD a un compresor. Además, habrá que tener en cuenta que hay que garantizar que tenga la lubricación adecuada para velocidades reducidas. Sin embargo, la introducción de compresores de tornillo con control de velocidad integrado ha permitido que el precio adicional del control de velocidad variable se reduzca significativamente. Por lo tanto, estas máquinas merecen ser tenidas en cuenta para todas las nuevas aplicaciones con muchas horas de marcha, en las que la demanda varía mucho. Más ahorros energéticos se lograrán con la mejora del control de presión, reduciendo la presión de generación media.

Otro ejemplo de uso de los VSD en compresores es el uso para refrigeración (figura 31). El uso de un VSD para el control de la temperatura (funcionamiento con cabezal flotante) en bombas y compresores de refrigeración (por ejemplo, cámaras frigoríficas) puede eliminar la alternancia en ciclos de arranque/apagado, con grandes ahorros energéticos. El control de la temperatura también se puede mejorar, en términos de diferencia entre las temperaturas internas y externas.

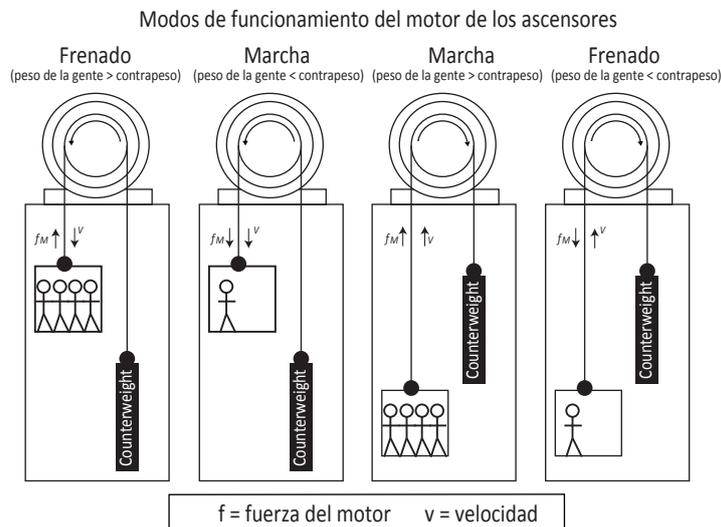
Figura 31. Compresor de refrigeración de velocidad variable.



4.4 ASCENSORES

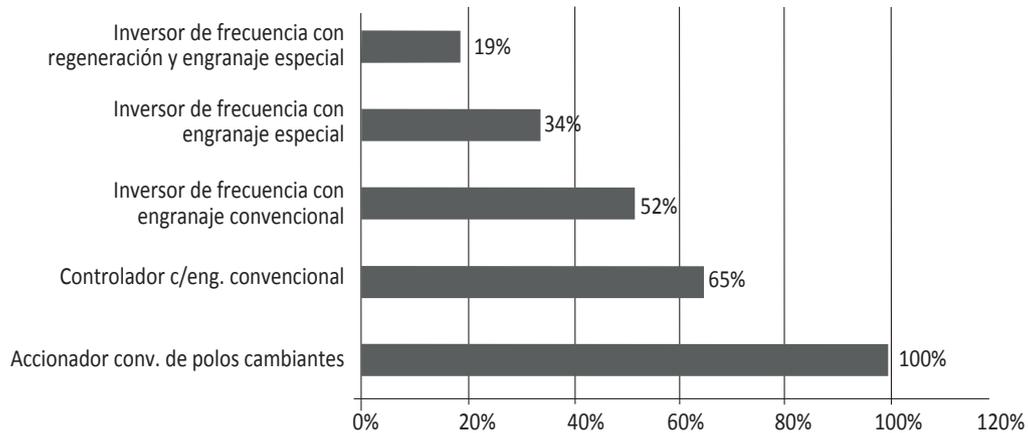
Las nuevas topologías de VSD permiten que la energía de frenado se vuelva a inyectar en la fuente o en la red. Esta característica puede ser una manera de ahorrar una cantidad significativa de energía en aplicaciones con frecuentes operaciones de frenado, como los ascensores. Esto sólo es posible si la transmisión mecánica del motor permite este modo operativo. Cuando el ascensor va hacia abajo y el peso de la carga (personas en su interior) es más grande que el contrapeso, el par motor tiene una dirección opuesta a la velocidad, es decir, el motor está frenando. De la misma manera, cuando el ascensor va hacia arriba sin carga, se pueden generar ahorros energéticos si se controla el motor con un VSD regenerativo (figura 32).

Figura 32. Modos operativos del motor del ascensor (f_m - Fuerza del motor; v - Velocidad).



En la figura 33 podemos observar posibles ahorros energéticos en ascensores, usando distintas tecnologías. Con el uso de sistemas de VSD regenerativos y con engranajes especiales, se puede reducir el consumo de energía en un 19%, en comparación el sistema convencional de motor de polos conmutables. En los ascensores de alta eficiencia nuevos también se están introduciendo motores de imanes permanentes con transmisión directa (sin engranajes), acoplamiento y frenado regenerativo.

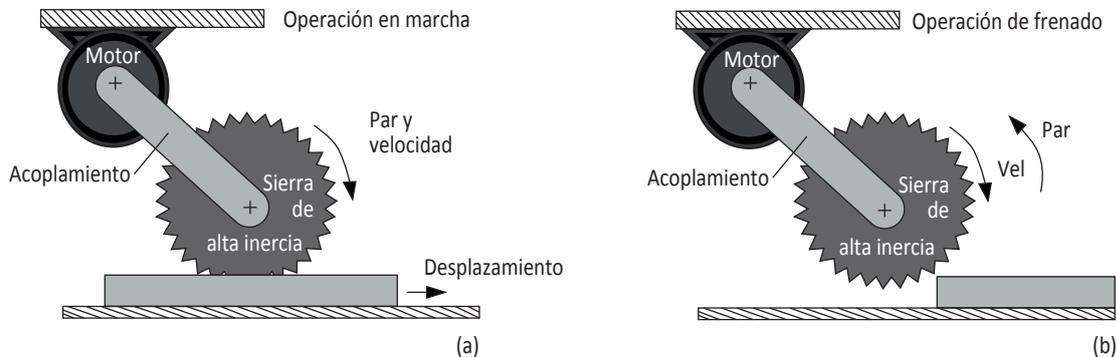
Figura 33. Balance energético de los ascensores, consumo energético promedio, porcentaje.
Fuente: Flender-ATB-Loher, Systemtechnik.



4.5 MÁQUINAS CENTRIFUGADORAS Y MÁQUINAS-HERRAMIENTAS

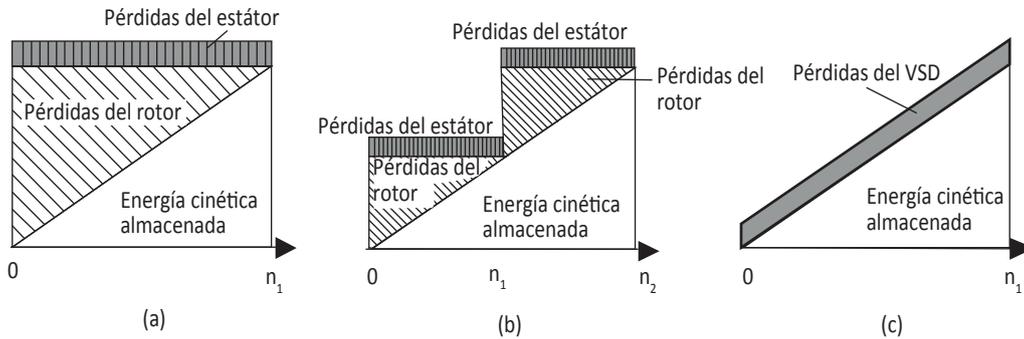
En cargas de inercia alta (p. ej., máquinas-herramientas) o en cargas de velocidad alta (p. ej., máquinas centrifugadoras), con frecuentes operaciones de aceleración/frenado, es posible ahorrar cantidades significativas de energía. Durante la marcha, este tipo de cargas tiene una gran cantidad de energía cinética que puede regenerarse volviendo a la red si se usa un VSD regenerativo (el mismo proceso regenerativo que se usa en los ascensores). Como ejemplo de este tipo de cargas podemos mencionar los tornos de alta velocidad con un alimentador automático o las sierras de alta inercia (figura 34).

Figura 34. Modos operativos de una sierra de alta inercia: a) operación de accionamiento; b) operación de frenado.



De hecho, cuando una sierra de alta inercia o un torno de alta velocidad están en marcha, la velocidad y el par tienen la misma dirección, pero al final de la operación, por lo general, es necesario que paren rápidamente. Así pues, es posible reinyectar la energía de frenado en la red eléctrica, en lugar de que se disipe en una resistencia. Otro aspecto importante es el proceso de aceleración. Como puede observarse en la figura 35, si se hace arrancar el motor simplemente (situación a), sin ningún control de velocidad, las pérdidas del rotor serán mayores que si usamos un motor de número de polos variable (situación b). Una técnica de aceleración más eficiente usa un VSD (situación c), que reduce el consumo de energía significativamente en comparación con las otras técnicas mencionadas.

Figura 35. Consumo de energía del periodo de aceleración:
 a) Motor estándar; b) Motor de número de polos variable; c) Variador de velocidad (VSD) Fuente: Siemens.



4.6 CINTAS TRANSPORTADORAS

En los dispositivos de par constante (p. ej., cintas transportadoras horizontales), el par es aproximadamente independiente de la carga transportada (solo depende de la fricción). Por lo general, la salida de manipulación de materiales de una cinta transportadora se controla regulando la cantidad de la entrada, y el par y la velocidad son aproximadamente constantes (figura 36). Pero, si se puede cambiar la entrada de los materiales en la cinta transportadora, es posible reducir la velocidad (el par es el mismo) y, como puede observarse en la figura 37, se logran ahorros energéticos significativos, proporcionales a la reducción de la velocidad.

Figura 36. Energía eléctrica que necesita una cinta transportadora.

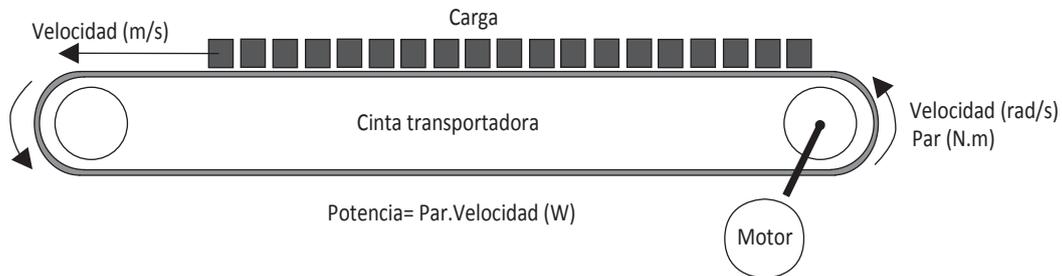
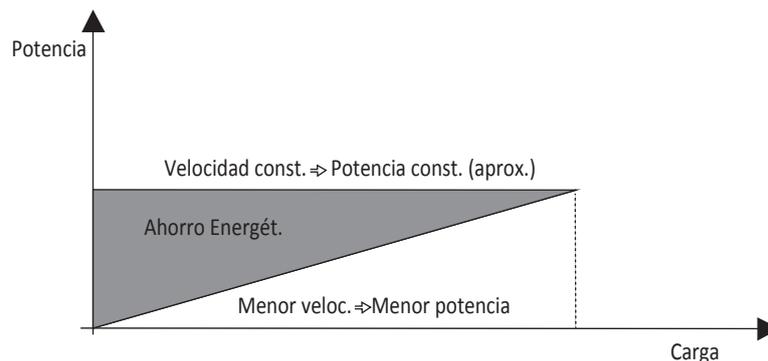


Figura 37. Ahorros energéticos de las cintas transportadoras con control de velocidad, en relación con la velocidad constante típica.



5

NORMAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Las principales economías del mundo tienen algún tipo de mecanismo regulador voluntario u obligatorio en lo que atañe a la eficiencia de los motores. La mayoría de estas economías tienen niveles de eficiencia mínima obligatoria (MEPS por su sigla en inglés) de los motores que se venden en los respectivos países y tienen sistemas de etiquetado para promover los motores de alta eficiencia.

Hasta hace poco, había en el mundo varios niveles o clases de eficiencia energética, lo que aumentaba las posibles confusiones y creaba barreras de mercados.

| | |
|-----------|-----------------------------------|
| CEMEP-EU | EFF1/EFF2/EFF3 |
| EE.UU. | EPAct/NEMA Premium |
| Australia | Mínima eficiencia/alta eficiencia |
| China | Grado 1, 2 y 3 |

Para aumentar la confusión todavía más, estos mecanismos de clasificación se basan en métodos de ensayo diferentes que pueden arrojar resultados significativamente distintos. Por lo tanto, los niveles de eficiencia no son directamente comparables.

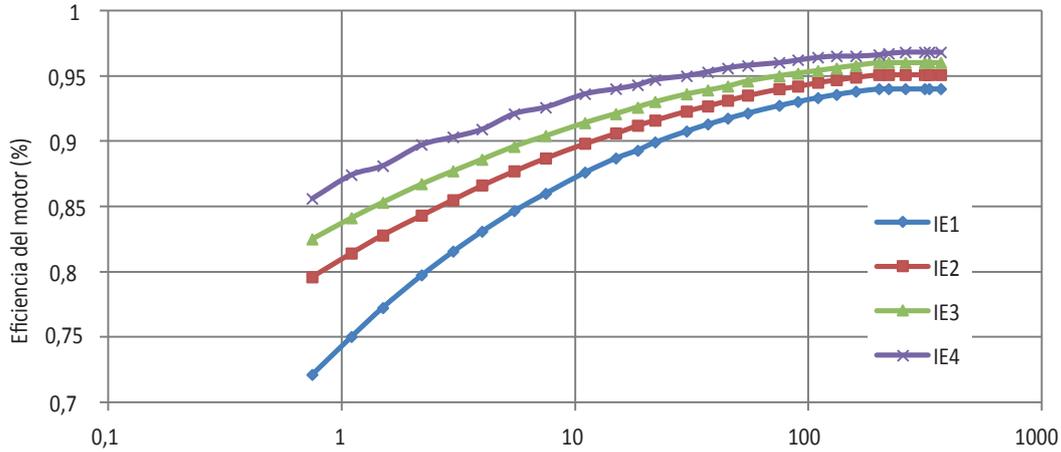
Por otra parte, las tolerancias de medición varían con los diferentes métodos de ensayo, y el impacto de la frecuencia del suministro (50 Hz o 60 Hz) que se usa en el ensayo complica aún más las cosas.

Con el propósito de armonizar los distintos mecanismos de clasificación de la eficiencia energética de los motores de inducción en uso en todo el mundo, la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) presentó en 2008 una nueva norma de clasificación - la IEC60034-30 (8). La norma define tres niveles de eficiencia energética (figura 38):

- IE3 - Eficiencia premium (equivalente a NEMA Premium).
- IE2 - Alta eficiencia (equivalente a EPAct/EFF1).
- IE1 - eficiencia estándar (equivalente a EFF2).

También introdujo un cuarto nivel, el IE4 - eficiencia Super Premium, pero no lo definió en su momento, ya que no había mercado suficiente ni información tecnológica disponible para poder normalizarlo. De hecho, se supone que serán necesarias otras tecnologías distintas de los motores de inducción de jaula para alcanzar estos altos niveles de eficiencia. El anexo A de la norma IEC 60034-31 presenta los límites nominales de la eficiencia Super-Premium (IE4) (*Guide for the selection and application of energy efficient motors including variable-speed applications*) (9).

Figura 38. Niveles de eficiencia IE1, IE2 y IE3 de la norma IEC 60034-30 para motores de 4 polos (8) y el nuevo IE4 propuesto en la norma IEC 60034-31 (9).



Posteriormente, en 2014 la IEC emitió una nueva versión de la norma de clasificación de los motores, designada esta vez como IEC 60034-30-1, en la cual definieron los límites para la categoría IE4 y se proyecta para el futuro la existencia de una nueva categoría denominada IE5, en la cual se aspira a que las pérdidas se reduzcan un 20% respecto a la categoría IE4.

La eficiencia y las pérdidas deberán ser determinadas mediante pruebas de conformidad establecidas en la norma IEC 60034-2-1 (10). El método de ensayo seleccionado debe ser de baja incertidumbre y habrá que incluirlo en la documentación del motor.

Es de esperar que ambas normas pongan fin a las dificultades que tenían los fabricantes de motores para el mercado mundial y que contribuyan a hacerlo más transparente.

5.1 REGLAMENTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EXISTENTES

El cuadro 6 presenta una visión general de los acuerdos voluntarios y de los reglamentos de eficiencia de los motores de inducción trifásicos de CA en todo el mundo. América del Norte (Estados Unidos, Canadá y México) es la región líder en la promoción de motores de alta eficiencia y de eficiencia Premium en todo el mundo.

Cuadro 6. Visión general de las normas de rendimiento energético mínimo (MEPS) en todo el mundo

| Niveles de eficiencia | Clases de eficiencia | Norma de ensayo | Regulación |
|-----------------------|----------------------|---------------------|---|
| | | IEC 60034-30-1 | IEC 60034-2-1 |
| Eficiencia Premium | IE3 | Baja incertidumbre | EE.UU. (2011) Europa (2015) * (>7,5 kW), (2017) Colombia (2020) |
| Alta eficiencia | IE2 | | EE.UU., Canadá, México, Australia , Nueva Zelanda, Brasil , Corea, China (2011), Europa (2011), Suiza (2011), Colombia (2018) |
| Eficiencia estándar | IE1 | Incertidumbre media | China, Brasil, Costa Rica, Israel, Taiwán, Suiza Colombia (2017) |

* IE3 o IE2 + VSD

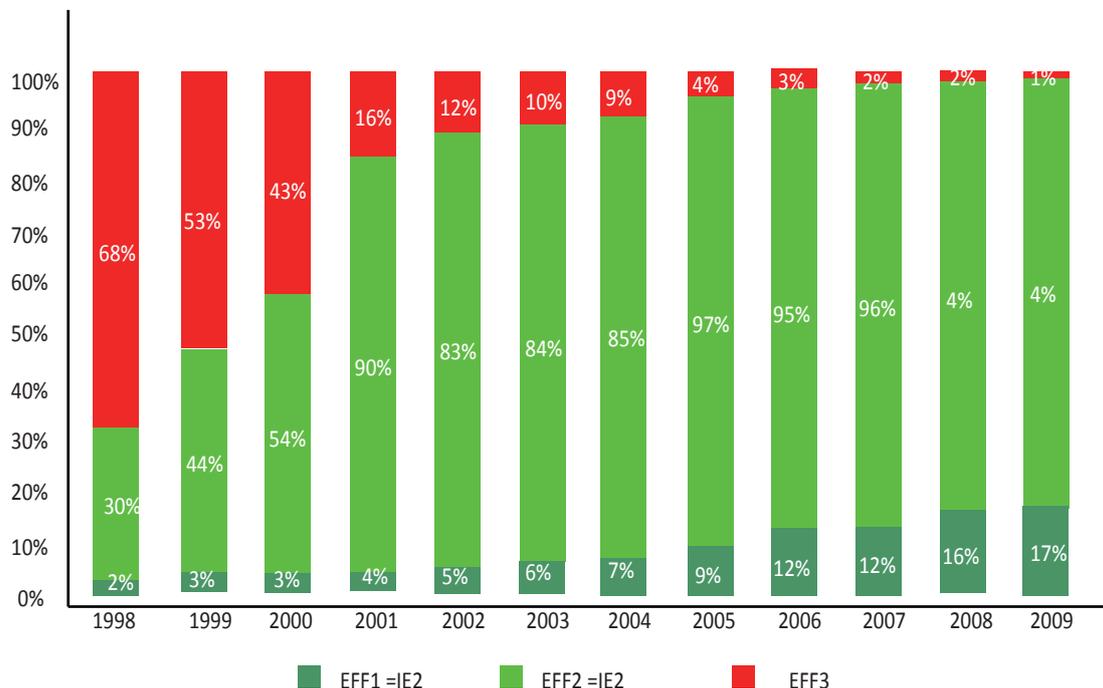
En 1998, se estableció un acuerdo con apoyo del Comité europeo de fabricantes de máquinas eléctricas y de electrónica de potencia (CEMEP) y de la Comisión Europea que fue refrendado por 36 fabricantes de motores que representaban el 80% de la producción europea de motores estándar. En este acuerdo, se definieron los tres niveles de eficiencia:

- EFF1
- EFF2
- EFF3

Sobre la base de este mecanismo de clasificación, los fabricantes de motores asumieron el compromiso voluntario de reducir la venta de motores del nivel de eficiencia EFF3 (eficiencia estándar).

El acuerdo CEMEP/UE fue un primer paso muy importante para promover la clasificación y etiquetado de la eficiencia de los motores, y logró una transformación del mercado significativa. Básicamente, se sacaron los motores de baja eficiencia del mercado europeo de motores, lo que fue un avance positivo en su momento (figura 39). Sin embargo, la penetración de motores de alta eficiencia y de eficiencia Premium sigue siendo modesta.

Figura 39. Total de ventas de motores dentro del acuerdo voluntario CEMEP/UE durante el periodo 1998-2009 (11)



Con el objetivo de mejorar la penetración de los motores eléctricos de alta eficiencia en el mercado europeo, la Comisión Europea decidió que era tiempo de establecer niveles de eficiencia obligatorios para los motores que se vendieran dentro de la Unión Europea. Los niveles de eficiencia se basaron en la norma de clasificación IEC60034-30.

El reglamento (CE) N° 640/2009 de la comisión del 22 de julio de 2009 estableció los requisitos de rendimiento mínimos (12), de la siguiente manera:

1. A partir del 16 de junio de 2011, los motores deben ser por lo menos del nivel de eficiencia IE2.
2. A partir del 1 de enero de 2015: los motores con una potencia nominal de 7,5-375 kW deben ser por lo menos del nivel de eficiencia IE3, o tener el nivel de eficiencia IE2 y estar equipados con un variador de velocidad.
3. A partir del 1 de enero de 2017: todos los motores con una potencia nominal de 0,75-375 kW deben ser por lo menos del nivel de eficiencia IE3, o tener el nivel de eficiencia IE2 y estar equipados con un variador de velocidad.

Estos requisitos se aplican a los motores de 2, 4 y 6 polos, a los motores de inducción trifásicos en los rangos de potencia anteriormente mencionados, de hasta 1000 V nominales y pensados para un servicio continuo.

Los siguientes tipos de motor están excluidos:

- Motores diseñados para funcionar totalmente sumergidos en un líquido.
- Motores totalmente integrados en un producto (por ejemplo, bombas o ventiladores) cuyo rendimiento energético no pueda someterse a ensayo independientemente del producto
- Motores diseñados específicamente para funcionar:
 - en altitudes superiores a los 1000 metros sobre el nivel del mar.
 - en lugares donde la temperatura del aire ambiente supere los 40°C.
 - a una temperatura de funcionamiento superior a 400°C.
 - en lugares donde la temperatura del aire ambiente sea inferior a -15°C (cualquier motor) o inferior a 0°C (motor con un sistema de refrigeración por aire).
 - en condiciones en las que la temperatura del agua del refrigerante en la entrada de un producto sea inferior a 5°C o superior a 25°C.
 - en atmósferas potencialmente explosivas, tal como se definen en la Directiva 94/9/CE.
- Motores-freno.

AMÉRICA DEL NORTE (EEUU, CANADÁ Y MÉXICO)

En 1992, el Congreso estadounidense aprobó la Ley de Política Energética (EPAAct) que establece los requisitos de eficiencia mínimos de los motores fabricados o importados para la venta en los Estados Unidos. Estas normas obligatorias entraron en vigor en octubre de 1997. En el cuadro 7 se presentan las características de los motores inicialmente incluidos en esta Ley. Desde entonces hasta 2008 las ventas de esos niveles de eficiencia crecieron del 15% al 54%.

Cuadro 7. Características de los motores incluidos en la EPAAct (13)

| |
|---|
| Motores incluidos en el mecanismo EPAAct: |
| Motores de inducción de jaula de ardilla polifásicos, diseño NEMA A y B |
| Potencia nominal 1-200 hp |
| Una sola velocidad |
| 230/400 voltios |
| 60 Hz |
| Nominal continua |
| Probado en conformidad con la norma IEEE 112- Método B |
| 2, 4 y 6 polos |
| Tipo de cubierta: Totalmente cerrado enfriado por ventilador (TEFC) y abierto a prueba de goteo (ODP) |

Mientras tanto, muchas compañías de electricidad y asociaciones industriales comenzaron a promover motores con más eficiencia que la de los niveles obligatorios de la EPart. Por lo tanto, la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (NEMA) empezó a pensar que había que definir un mecanismo de clasificación de los motores de alta eficiencia Premium. En junio de 2001, la NEMA concedió a esos motores “mejores que EPart” un reconocimiento especial al crear la etiqueta llamada NEMA Premium.

Con el fin de mejorar aún más la penetración en el mercado de los motores de eficiencia Premium, el Congreso de los EE.UU. aprobó la Ley de Independencia y Seguridad Energéticas de 2007 (EISA), que entró en vigencia en diciembre de 2010. No sólo fija niveles obligatorios de eficiencia mínima más altos, sino que también amplía el ámbito de las normas existentes, de la siguiente manera:

- Las normas de eficiencia mínima actuales con referencia a motores de inducción de uso general definidas en la EPart de 1992 y comprendidas en las leyes federales deben adaptarse a los niveles NEMA Premium.
- Siete tipos de motores de inducción polifásicos de baja tensión de caballos de fuerza enteros comprendidos en las leyes federales deben respetar los estándares de eficiencia mínima de acuerdo a los niveles definidos por la EPart de 1992 para los motores de inducción de uso general.
 - Motores de armazón U.
 - Motores de diseño C.
 - Motores de bombas de acoplamiento directo.
 - Motores sin base.
 - De empuje normal de eje sólido vertical (probado en una configuración horizontal).
 - Motores de 8 polos (900 rpm).
 - Todos los motores polifásicos de tensiones de hasta 600 voltios con excepción de los de 230/460 voltios.
- Los motores de inducción de uso general con potencias nominales de entre 200 y 500 caballos de fuerza también deben cumplir los niveles de eficiencia según lo especificado en la EPart de 1992.

En Canadá y Estados Unidos, las normas de rendimiento energético mínimo (MEPS) relacionadas con motores que cumplen los requisitos de la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (NEMA) son idénticas, pero el programa canadiense también abarca los motores métricos. Recientemente, México terminó de revisar sus MEPS, de manera que sus niveles son ahora equivalentes a los de los Estados Unidos y Canadá.

Los EE.UU. han publicado recientemente un reglamento, *Energy Conservation Standards for Small Electric Motors*, acerca de la eficiencia de “pequeños motores de inducción” monofásicos o polifásicos, de entre 1/4 y 3 caballos de fuerza.

En general, podemos encontrar pequeños motores eléctricos monofásicos en productos y electrodomésticos que tengan bombas, ventiladores y en herramientas eléctricas. Los motores pequeños polifásicos se usan para impulsar equipos como bombas, ventiladores y compresores.

BRASIL

En 1993, Brasil inauguró un programa voluntario de etiquetado de motores de inducción. Fue un esfuerzo coordinado entre los fabricantes de motores, el CEPEL (*Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobras*) y el INMETRO (*Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial*). El programa define niveles de eficiencia de revisión periódica para motores estándar y de alta eficiencia.

En 2001, el decreto 4.508/2002 introdujo MEPS de aplicación en motores de inducción trifásicos de rango de potencia entre 0,75 y 185 kW, de 2 y 4 polos; y de rango de potencia entre 0,75 y 110 kW, de 8 polos. No se puede vender en el país motores por debajo de los niveles de eficiencia estándar (similar a IE1).

Desde entonces (2010), se elevó las exigencias de los MEPS hasta niveles de alta eficiencia (IE2).

AUSTRALIA Y NUEVA ZELANDIA

Australia implementó sus requisitos de rendimiento energético mínimo (MEPS) en octubre de 2001 para los motores eléctricos trifásicos entre 0,73 kW y <185 kW. Se establecieron por medio de la AS/NZS 1359.5-2000. Los MEPS no se aplican a los motores sumergibles, los sistemas con motor integrado, los motores de varias velocidades y los clasificados únicamente para ciclos de servicio cortos.

Los MEPS se actualizaron en abril de 2006 y se publicaron con detalle en la AS/NZS 1359.5-2004 de septiembre de 2004. Los niveles de eficiencia mínimos se elevaron a equivalentes de la IE2 y los de alta eficiencia a equivalentes de la IE3.

En la AS 1359.102 se describen los dos métodos de medición de la eficiencia permitidos:

- Método A, idéntico al método 1 de la IEC 61972 y técnicamente equivalente al método B especificado en la IEEE 112.
- Método B, basado en el procedimiento de ensayo “suma de las pérdidas” de la IEC 60034-2.

Por lo tanto, hay dos cuadros para cada nivel de eficiencia, uno para cada método de determinación de la eficiencia.

CHINA

China presentó por primera vez sus normas de rendimiento energético mínimo en 2002 (GB18613: 2002). Desde entonces se revisaron las normas y se las cambió por la GB18613: 2006 - “Valores mínimos permitidos para la eficiencia energética y grados de eficiencia energética para motores asíncronos trifásicos pequeños y medianos”. La norma revisada, basada en el acuerdo CEMEP-UE, establece los grados de eficiencia energética (grados 1, 2 y 3), en donde el grado 1 representa en nivel de eficiencia mayor.

La norma entró en vigor en 2007 e impide que se fabriquen o que se vendan en el país motores de eficiencia inferior al grado 3 (equivalente a IE1). Actualmente los requisitos de eficiencia mínimos se elevaron a nivel IE2. También se espera que se introduzca un mecanismo voluntario con una etiqueta para motores de eficiencia IE4.

Se aplica a los motores de uso general (incluidos los a prueba de explosiones) de tensión de 690 V y menor, alimentados con corriente alterna trifásica de 50 Hz, con potencia nominal de entre 0,55 kW y 315 kW para los grados 2 y 3, y de 3 a 315 kW para el grado 1, con 2, 4 y 6 polos, de una sola velocidad, refrigerados con ventilador y diseño N.

La eficiencia del motor debe ser puesta a prueba con el método de análisis de pérdidas descrito en GB/T 1032. En este método se calcula que las pérdidas por corrientes de fuga del motor son el 0,5% de la potencia nominal de entrada. La IEC 60034-2-1 califica este método como un método de ensayo de incertidumbre media y, por lo tanto, no lo acepta como método de ensayo válido para la norma de clasificación IEC60034-30. Se estipuló que es necesario revisar la GB/T 1032 con el fin de coordinarla con las normas IEC.

En China también se están desarrollando normas de eficiencia energética para motores pequeños.

Se espera que la Administración de Normalización de China apruebe la versión final de la norma dentro de poco. Se especifican los MEPS, los MEPS que se querría alcanzar, los grados de eficiencia y los métodos de ensayo. Esta norma se aplica a motores asíncronos trifásicos pequeños (10 W - 2,2 kW), motores asíncronos de condensador (10 W - 2,2 kW), motores de inducción de condensador de arranque (120 W - 3,7 kW), motores de inducción de condensador de doble capa (250 W - 3 kW) para uso general con tensión ≤ 690 V, suministro de CA 50 Hz, y también para motores de ventiladores de aire acondicionados para ambientes (6 W - 550 W).

COLOMBIA

En Colombia los primeros esfuerzos en la regulación de motores eficientes se remontan al año 2001, justo después de la emisión de la Ley 697 de 2001, conocida como Ley URE, la cual declaró el Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE) como un asunto de interés social, público y de conveniencia nacional, fundamental para asegurar el abastecimiento energético.

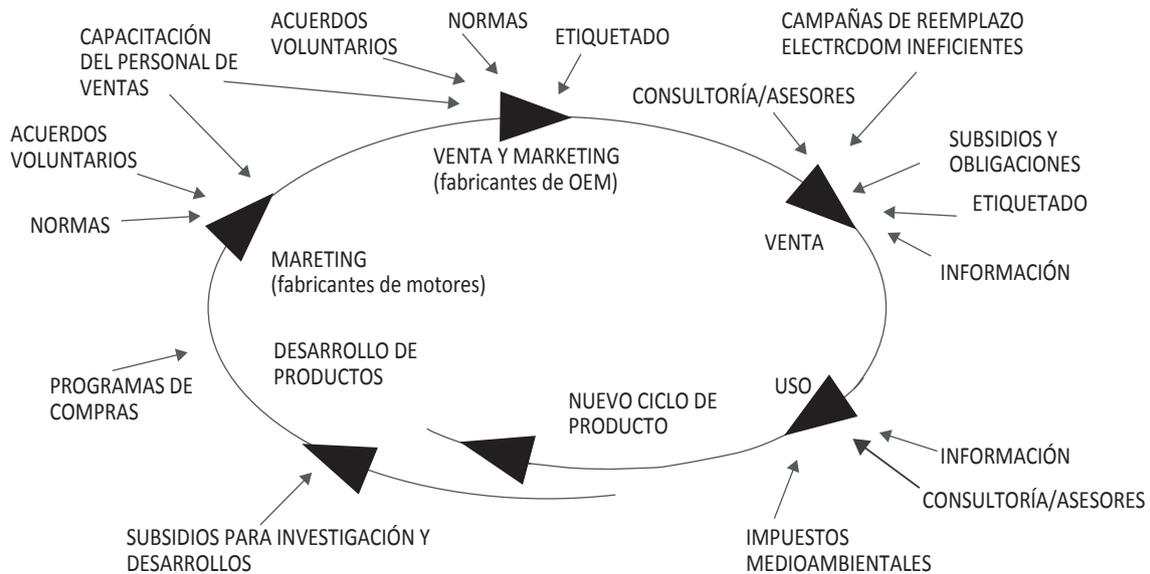
Con base en esta Ley se estableció el programa CONOCE, con el objetivo de normalizar, certificar y etiquetar productos de uso final de energía, dentro de los cuales se incluyeron los motores eléctricos de corriente alterna. Después de recorrer un camino largo de consultas, desarrollo de normas técnicas, desarrollo de entidades certificadoras, proyectos de reglamento técnico y notificaciones a la Organización Mundial del Comercio, se expidió el Reglamento Técnico de Etiquetado (RETIQ) el 18 de Septiembre de 2015, el cual entró en vigencia el 31 de Agosto de 2016.

El RETIQ estableció un programa de introducción de los motores eficientes en Colombia que se extiende hasta el año 2021 y que se constituye en la definición de MEPS para el país. Inició con la restricción de la comercialización de motores con eficiencia menor al 50% desde el 31 de Agosto de 2017 y continua con la restricción de la comercialización de los motores IE1 a partir del 31 de Agosto de 2018, fecha a partir de la cual solamente se permite entonces la comercialización de los motores IE2 y mejores. A partir del 31 de Agosto del 2020 solamente se permitirá la comercialización de los motores IE3 en potencias superiores o iguales a 7,5 HP, y a partir del 31 de Agosto de 2021 se hará extensiva la comercialización de motores IE3 para potencias inferiores a 7,5 HP.

5.2 POLÍTICAS Y PROGRAMAS DE INCENTIVOS

Paralelamente a la implementación de normas vinculantes que regulan la eficiencia eléctrica de los motores, se pusieron en marcha algunas iniciativas con la finalidad de aumentar el porcentaje de motores eléctricamente eficientes y de sus variadores. La experiencia cosechada a través de muchas iniciativas de ahorro en todo el mundo muestra que los programas más exitosos se basan en una mezcla de información técnica y de incentivos financieros (figura 40) (14).

Figura 40. Instrumentos de política para reducir los obstáculos para difundir sistemas de motores eléctricos de alta eficiencia en todo el ciclo del producto (15)



La mayoría de los programas que se han implementado en todo el mundo se basan en elementos comunes, por ejemplo:

ETIQUETADO

Como se dijo anteriormente, hay algunos sistemas de etiquetado de motores con eficiencia mayor a la de los estándares mínimos: NEMA Premium (EE.UU.), Normas de alto rendimiento voluntario (Australia), IE3 (Europa), Motores de grado 1 (China). El objetivo de estos sistemas de etiquetado es aumentar la visibilidad de los productos que superan los requisitos de eficiencia energética mínimos y educar a los consumidores. Las etiquetas otorgan una gran visibilidad y constituyen una manera fácil de identificar los equipos de alto rendimiento.

CAPACITACIÓN Y EDUCACIÓN

Algunos países han creado planes de capacitación para el personal técnico -por lo general ingenieros e ingenieras de planta y de mantenimiento, y a veces, personal de producción o gerentes de energía. Estas también serán las personas que podrán identificar proyectos de ahorros energéticos y conseguir financiación para los mismos. Existen materiales y planes de promoción y capacitación que apuntan a necesidades diferentes en distintas etapas del camino para implementar exitosamente proyectos de ahorros energéticos:

- Interesarse en ahorrar energía.
- Recibir buena información técnica sobre opciones de ahorros energéticos.
- Identificar proyectos de ahorros energéticos posibles.
- Redactar y presentar propuesta(s).
- Implementar el o los proyectos.
- Calcular los ahorros energéticos logrados.

Existe una selección de materiales, desde folletos introductorios cortos y sencillos, hasta guías con información técnica detallada para las personas con más experiencia.

También hay directrices sobre la aplicación de los motores y variadores energéticamente eficientes que no tratan solamente el tema de los motores, sino que también abarcan los sistemas de los que los motores forman parte. Estas directrices tienen distintos grados de complejidad: algunas examinan con mucho detalle algunas aplicaciones como bombas, ventiladores, compresores, etc.

AUMENTAR LA CONCIENCIA DEL PÚBLICO

Se usan varias técnicas, como, por ejemplo:

- Publicidad.
- Comunicados en la prensa especializada.
- Publicidad directa, boletines.
- Conferencias.
- Talleres.

ESTUDIOS DE CASOS

Los mejores estudios de casos de ahorros energéticos de la vida real muestran no solamente los beneficios, sino también los problemas, de manera que los lectores los vean como historias reales que no ocultan consideraciones prácticas importantes. Estos estudios de caso no sólo inspiran a otros a emprender proyectos parecidos, sino que también contribuyen a que los proveedores de equipos vendan sus productos y a que el personal que tiene que asignar fondos se sienta cómodo al saber que estas tecnologías son una buena inversión de los fondos de la empresa.

AYUDAS PARA CÁLCULOS

Las ayudas para cálculos, como los programas informáticos, pueden dar mejores estimaciones de los ahorros energéticos posibles. Sin embargo, en la práctica, (especialmente en el caso de los programas informáticos de los VSD), no se conocen los datos de entrada con la precisión suficiente como para dar respuestas particularmente precisas. Sin embargo, dan una buena indicación de los ahorros energéticos probables, lo que en general resulta adecuado para decidir si se justifica seguir estudiando el tema de los ahorros energéticos.

Las bases de datos de motores eléctricos existentes (EURODEEM, Motormaster+) son una herramienta de información importante que permite a los usuarios llevar a cabo una evaluación de las mejores opciones a la hora de instalar o reemplazar un motor y, por lo tanto, ayudan a ahorrar electricidad y dinero. Por otra parte, incluyen herramientas de gestión de inventario de motores, seguimiento de registros de mantenimiento, análisis de la eficiencia, evaluación de ahorros, contabilidad del consumo de energía e informes medioambientales.

INCENTIVOS FINANCIEROS

En la actualidad se considera que los reembolsos son sobre todo una medida de corto plazo para ayudar a estimular el mercado de productos de ahorro energético. En América del Norte, por ejemplo, los reembolsos fueron muy útiles antes de las leyes de que establecieron los estándares de eficiencia de los motores.

Se otorgaron con éxito reembolsos para motores energéticamente eficientes por montos que, por lo general, igualaban el precio adicional de los motores de eficiencia mayor. También fue necesario asignar dinero a los distribuidores para estimularlos a que contaran con existencias de motores de este rango. Aunque resulte atractivo otorgar reembolsos directamente a los usuarios, es más conveniente asignarlos a los fabricantes, ya que esto crea un “efecto multiplicador” del valor del descuento a lo largo de la cadena de ventas. Es inevitable que se compren algunos motores energéticamente eficientes en casos en los que las horas de marcha son insuficientes para que sea una inversión con un buen retorno, pero en general, es de esperar que este mecanismo genere buenos retornos, y que, en particular, estimule el interés en los motores energéticamente eficientes.

También se otorgaron reembolsos para variadores de velocidad, pero este caso es un poco más complicado. La mayoría de los variadores de velocidad se venden por motivos que no tienen nada que ver con la energía, así que se necesitan sistemas que garanticen que los usuarios van a usarlos solamente en las aplicaciones autorizadas. Es probable que sea necesario hacer algún tipo de evaluación del potencial de ahorros energéticos, y si esto implica que se haga un seguimiento correcto de la energía eléctrica durante un periodo representativo de tiempo (tal vez algunos días), el proveedor potencial del equipo tendrá que enfrentar muchos gastos. Una vez que hayan recibido una evaluación detallada de los ahorros energéticos, es natural que la empresa pida varios presupuestos para hacer la compra más conveniente, de manera que es posible que los proveedores de equipos sean reacios a participar. Los mecanismos de reembolso que ofrecen un descuento de tal vez el 50% del costo del VSD sirven para estimular la conciencia general, pero es posible que el aumento de la demanda no sea demasiado grande, ya que no habrá cambios en los niveles de autorización de financiamiento. Un punto importante en relación con los reembolsos para VSD es que van a estimular que los usuarios se fijen en el precio de los VSD. De todos modos, la caída de los precios y los cambios resultantes en el mercado de los VSD sugieren que sería mejor que los usuarios miraran más la calidad de los servicios y el apoyo técnico. Será necesario considerar cuidadosamente el efecto a largo plazo de los reembolsos para VSD si se quiere garantizar un cambio del mercado sostenible (16).

Otra herramienta que se usa para incentivar que los equipos energéticamente eficientes aumenten su participación de mercado son los préstamos a bajo interés o sin intereses.

También se usan mecanismos de desgravación sobre bienes de capital, que reducen los impuestos que hay que pagar, como forma de incentivar inversiones en equipos energéticamente eficientes. Un cierto porcentaje del costo de los activos financieros se puede considerar como desgravación sobre bienes de capital durante el periodo contable en el que fueron comprados.

Varias compañías de electricidad y proveedores de equipos probaron mecanismos en los que el equipo (por lo general, VSD) se pagaba con los ahorros energéticos, es decir, de manera que fuera una adquisición sin costo. Si bien este tipo de mecanismo tiene una apariencia muy simple, en la práctica muchos mecanismos fallaron debido a la dificultad para ponerse de acuerdo en los términos exactos del acuerdo. En particular, es posible que no haya acuerdo sobre el nivel verdadero de los ahorros energéticos debido a cambios en el patrón de uso, o sobre la corrección o la precisión de las mediciones. En mecanismos como este, en los que los ahorros energéticos reales son centrales, hay que tener mucho cuidado de garantizar que las estimaciones de los ahorros energéticos son razonables, y es mejor sobrestimarlos ligeramente para evitar disputas posteriores.

OTRAS HERRAMIENTAS FINANCIERAS

Licitaciones - Básicamente es una subasta en la que los usuarios de electricidad ofrecen el menor precio por reembolsos para medidas de ahorro de electricidad. En este caso los usuarios de los motores compiten por obtener financiación entre sí y con otros proyectos.

Sanciones - Diversas formas de impuestos en las facturas de electricidad pueden contribuir a que las medidas de ahorro de energía sean más atractivas.



PARTE 2

6

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE LOS SISTEMAS DE MOTORES

La evaluación energética de los sistemas de motores es un punto inicial excelente para entender qué sistemas de motores ofrecen las mejores oportunidades para ahorrar energía. La evaluación:

- Identifica algunos “resultados rápidos” o ideas de cosas sencillas que no requieren que se siga investigando.
- Identifica algunos sistemas que requieren un poco de investigación dentro de la evaluación de los sistemas de motores para obtener la información adecuada a fin de hacer una propuesta de inversión.
- Identifica algunos sistemas que justificarían una evaluación de oportunidades más detallada de los sistemas de ventiladores, bombas, o aire comprimido.

Recuerde: mire, escuche y haga preguntas. ¡Ninguna pregunta es demasiado obvia!

- Instrumentos - ¿son fiables?.
- Uso de la energía - ¿qué se está midiendo exactamente?.
- Historial de mantenimiento - ¿Hay algún secreto inconfesable?.
- Máquinas con problemas - ¿qué claves pueden tener las operadoras y los operadores aún sin saberlo?.

INFORMACIÓN SOBRE EL USO DE LOS MOTORES EN EL SECTOR

Si examinamos los resultados de estudios previos sobre el uso de los motores en plantas del mismo tipo que la nuestra, podremos obtener claves importantes para determinar qué motores están usando mucha energía y cuáles son las mejores oportunidades. Esto será muy útil en la próxima etapa cuando hagamos una evaluación energética completa o más detallada.

SELECCIÓN DE LOS SISTEMAS DE MOTORES A CONSIDERAR

Para que la duración de la evaluación energética sea razonable, conviene elegir solo entre 50 y 100 de los motores más grandes de la instalación, de manera que abarque tal vez una veintena de sistemas. Conviene que la lista se ajuste calculando el uso de la energía anual real de cada uno de esos motores, para lo que se considerará también las horas de marcha y la carga porcentual:

Consumo anual de energía = Potencia nominal (kW) x horas de marcha anuales x carga (%)

Cuando se ignora la carga, se usa un valor por defecto de 67% que es un promedio conveniente. (En realidad, esto subestima el uso de la energía en el sentido de que ignora la eficiencia real del motor, pero para esta primera proyección es bastante adecuado).

Una vez que los sistemas de motores se han clasificado por uso de la energía, se puede evaluar las oportunidades para la conservación de la energía de cada uno.

ESTABLECER PRIORIDADES

Dónde buscar primero:

- Equipos grandes.
- Tiempos de inactividad prolongados.
- Servicios variables.
- Equipos de apoyo.
- Equipo con problemas.

Dónde buscar después:

- Equipo de procesos (*valor de rendimiento del proceso demasiado alto aunque la planta ya haya sido optimizada para dicho proceso*).
- Procesos críticos (*el riesgo de problemas inesperados es inaceptable*).
- Equipos pequeños (*el uso de la energía es demasiado pequeño para justificar una investigación detallada o para implementar cambios*).
- Equipos cuyo reemplazo ya está programado (*amortización financiera poco atractiva*).

EVALUACIÓN DE LAS OPORTUNIDADES

Para cada uno de los motores de la lista, considere las siguientes cinco áreas de ahorros energéticos:

- Apagar el motor cuando no se lo necesita.
- Hacerlo funcionar más lentamente. (controlar la velocidad del motor).
- Reducir las pérdidas del motor (mejorar la eficiencia del motor).
- Reducir las pérdidas de la transmisión.
- Reducir las pérdidas en el sistema de accionamiento.

ESTIMAR EL POTENCIAL DE AHORROS ENERGÉTICOS

Hacer una estimación aproximada de los ahorros energéticos y de los costos de implementación de las oportunidades identificadas.

EVALUACIÓN DETALLADA DEL POTENCIAL DE AHORROS ENERGÉTICOS

Conviene dividir las oportunidades evaluadas en las siguientes categorías de acción:

- Algunas oportunidades son “soluciones rápidas” que requieren muy poca financiación y se amortizan enseguida.
- Otras oportunidades no son rentables y hay que rechazarlas inmediatamente.
- Oportunidades que implican consideraciones económicas que podrían ser importantes y que requieren más estudio, incluyendo la recopilación de más datos.

CONTROL DE LA CARGA DEL MOTOR

La primera cuestión que hay que verificar es si la energía eléctrica o el trabajo suministrado corresponden a los requisitos de carga reales. Las medidas más eficaces en función de los costos y las más racionales son las que apuntan a evitar que el motor marche en vacío. Por lo tanto, las primeras preguntas tienen que ver con ajustar la carga correctamente, distinguiendo entre medidas de apagado comunes y corrientes y medidas más selectivas de control de las cargas variables.

¿Se puede apagar el motor cuando no se lo necesita?

Compare el tiempo de marcha real del motor con el tiempo real en el que está trabajando de verdad, por ejemplo:

- Vacaciones.
- Fines de semana.
- Por la noche.
- Comienza demasiado antes de que empiece el turno.
- Termina mucho después de que termine el turno.
- Pausas del almuerzo, de media mañana y de media tarde.

En estos casos es posible obtener ahorros energéticos instalando interruptores temporizadores, de proximidad o de carga.

MARCHA CONTINUA CON CARGAS IRREGULARES

- Operación por lotes.
- Uso irregular de los servicios.
- Apagado de uno de los motores de un grupo de motores.

En el caso de que haya un motor funcionando de manera irregular, es posible instalar varias máquinas o una máquina más pequeña que se adapten mejor a las condiciones de carga

¿LA DEMANDA VARÍA?

¿Puede ser que la demanda varíe a causa del volumen de actividad, las temperaturas externas, el tipo de producto, etc.?

Mientras más tiempo el flujo de la demanda sea pequeño, mejor para las consideraciones económicas.

Aplicaciones típicas de los controles tipo VSD:

- Bombas de circulación agua.
- Ventiladores de torres de enfriamiento.
- Ventiladores de extractores.
- Calderas
- Sistemas de gestión energética (EMS por sus siglas en inglés: Energy Management Systems)
- Bombas de refrigeración secundarias.
- Ventiladores de ventilación de volumen variable.

Los ahorros potenciales que se pueden obtener si se instala un VSD dependen de las horas de funcionamiento y del ciclo de servicio. Un buen ejemplo de esto es cuando la carga del motor de una

bomba varía entre el 100% y el 10% de la potencia a plena carga y cuando funciona la mitad del tiempo con las cargas más bajas. Además, cuando la bomba funciona más de 5000 horas anuales. Se recomienda hacer el seguimiento de todos los ahorros energéticos potenciales y de la amortización.

El uso de variadores de velocidad tiene beneficios adicionales en términos de la calidad del producto, el menor mantenimiento, etc., de manera que la evaluación de todos esos ahorros sirve para estimular la instalación de variadores de velocidad.

Otros usos de los VSD son:

- Agitadores - pueden producir buenos ahorros pero dependen mucho de la aplicación.
- Cintas transportadoras - algunos ahorros provienen de la reducción de las pérdidas internas.
- Compresores de aire.
 - Compresores de tornillo: Si se les agrega el VSD después, no se logrará un gran resultado, pero puede ser una buena idea si tienen un VSD integrado.
 - Compresores centrífugos: Dejar solos.
 - Compresores recíprocos: Es posible, pero posiblemente no convenga hacer un gasto significativo en estas máquinas antiguas.
 - ¿Se puede desacelerar el motor o lo que ocurre es que el equipo está sobredimensionado para la aplicación?

Los motores más modernos están diseñados para alcanzar la eficiencia máxima con el 75% de la plena carga y para que la variación de la eficiencia entre 50 y 100% sea mínima. Sin embargo, para cargas del 25% de la plena carga o menores, se verifica una reducción de la eficiencia significativa y es en este nivel que habría que considerar seriamente la posibilidad de instalar un motor más pequeño.

La regla del cubo que se aplica a los ventiladores y a las bombas centrífugas en los sistemas de poca altura nos dice que, si reducimos la velocidad en apenas un 20%, podremos obtener ahorros energéticos de hasta el 50%. Por lo tanto, estas son las aplicaciones a las que hay que apuntar en la etapa inicial de preselección. Si se puede desacelerar la cadena de accionamiento del motor, se pueden obtener ahorros importantes.

Las plantas de procesos directos como cintas transportadoras, máquinas herramientas y unidad de embalaje se optimizan en general para mejorar la eficiencia de la producción, de modo que no hay mucho margen para controlar la velocidad. De hecho, este es el tipo de aplicaciones en las que es más probable que haya controles de velocidad. La instalación y puesta en servicio de nuevos equipos puede implicar costosos períodos de inactividad y provocar rechazos de producción temporales durante la puesta en servicio, así que es mejor dejar estas aplicaciones para después.

¿HAY OCASIONES EN LAS QUE SE REQUIERA QUE EL FLUJO DE LA DEMANDA SEA MUCHO MAYOR O MUCHO MENOR?

Es posible que la velocidad sea aceptable la mayor parte del tiempo, pero durante esos periodos puede ser mucho menor (por ejemplo, para los requisitos de extracción por las noches) o mucho mayor (por ejemplo, para los requisitos de extracción rápida de emergencia). Podría convenir una máquina de varias velocidades.

REDUCCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DEL MOTOR (MOTORES ELÉCTRICOS EFICIENTES)

Es raro que conozcamos la eficiencia de los motores de la instalación, sobre todo si hay varias marcas, como suele ocurrir en el caso de equipos OEM. Antes de ponernos a buscar esa información, se sugiere establecer una política única y válida para toda la instalación que rija el uso de los motores de alta eficiencia (HEM) y las decisiones relacionadas con el reemplazo o la reparación de los motores. Dado que de todos modos la mayoría de las medidas sólo pueden implementarse cuando se debe reemplazar un motor, este enfoque realista reduce en gran medida la duración de las auditorías iniciales, sin dejar de aprovechar ninguna de las medidas de ahorros energéticos económicamente significativas.

En general, el dimensionamiento tiene una importancia práctica menor, y es raro que las unidades fabricadas en serie como compresores, ventiladores y la mayoría de las bombas estén demasiado sobredimensionadas. En cambio, en las instalaciones diseñadas a medida suele haber márgenes de seguridad excesivos, de manera que es más probable encontrar motores sobredimensionados.

PÉRDIDAS DEL ACOPLAMIENTO Y DE LA TRANSMISIÓN

Si el motor no es de acoplamiento directo, revise el tipo de transmisión y verifique si está bien mantenida. La mayor parte de las pérdidas de eficiencia se producen en las correas y en las cajas de transmisión.

EQUIPOS Y SISTEMAS DE ACCIONAMIENTO

Para cada motor, considere la eficiencia del equipo y del sistema que impulsa. Para las oportunidades más simples, será suficiente identificar las oportunidades simples y obvias. Para las opciones más avanzadas, se necesitará un especialista, tal vez en el marco de una auditoría del sistema de ventiladores, bombas y aire acondicionado.

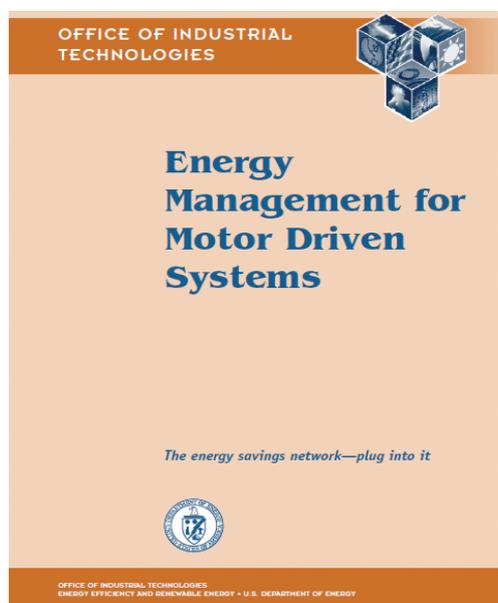
7

MEDICIONES

Hacer mediciones toma tiempo y cuesta dinero. Algunas oportunidades de ahorros energéticos son tan obvias que no tiene sentido obtener ningún dato del consumo de energía real. Pero si se necesitan más datos para estar más seguros acerca de una posible medida, o para desarrollar un estudio de viabilidad más convincente, hay varias opciones disponibles.

Se puede encontrar más información en la siguiente publicación de acceso público:

Recurso 1 - Energy Management for Motor-driven Systems. Departamento de Energía de los Estados Unidos, rev. 2, marzo de 2000



Los siguientes capítulos son de particular interés:

Capítulo 4 *Taking Field Measurements*

Capítulo 5 *Motor Load and Efficiency Estimation Techniques*

CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD

La siguiente es solamente una orientación general. Únicamente se pueden realizar mediciones si se cuenta con la competencia necesaria para hacerlo.

- No utilice instrumentos manuales por encima de los 600 voltios.
- Use guantes para la tensión de red.
- Mantenga la mano izquierda aparte cuando ponga una sonda.
- Átese el pelo o la ropa que estén sueltos.
- Al conectar los transductores de corriente a un dispositivo de visualización separado, tenga cuidado con los extremos desconectados.
- Siempre que sea posible, conecte las clavijas cuando la corriente esté apagada.
- Verifique periódicamente que las clavijas y los conectores estén en buenas condiciones. En caso de duda, descártelos.
- Use clavijas adecuadas para la tensión nominal.

SENSIBILIDAD DE LA CARGA DEL MOTOR A LA VELOCIDAD DE FUNCIONAMIENTO

Para cargas centrífugas como ventiladores o bombas, hasta un pequeño cambio en la velocidad a plena carga del motor implica un cambio significativo en el consumo anual de carga y de energía. Las leyes de los ventiladores o de “afinidad” establecen que la carga que las cargas centrífugas le imponen a un motor varía con la velocidad angular al cubo. Cuando se piense en hacer cambios en el motor, resulta útil medir la velocidad.

La mayoría de los motores energéticamente eficientes funcionan con un “deslizamiento” reducido, quiere decir que funcionan con una velocidad levemente superior a la de los motores de eficiencia estándar equivalentes. Esta pequeña diferencia - en promedio de sólo 6 a 12 rpm para motores de velocidad síncrona de 1800 rpm- es significativa. Un pequeño aumento de 12 rpm, que lleve la velocidad angular del motor a plena carga de 1740 a 1752 rpm, puede generar un 2% de aumento de la carga que el equipo de rotación le impone al motor. Un aumento de 40 rpm puede aumentar el consumo de energía en un 7%, contrarrestando totalmente los ahorros energéticos que se podrían esperar de la compra de un motor energéticamente eficiente.

Sin embargo, esta mayor velocidad significa que el trabajo se hace a un ritmo más rápido, de manera que, si el control es correcto, aun así, se generarán los ahorros energéticos esperados.

8

ENERGÍA Y MANTENIMIENTO

8.1 BENEFICIOS DE LA MEJORA DEL MANTENIMIENTO

Un sistema de motores bien mantenido:

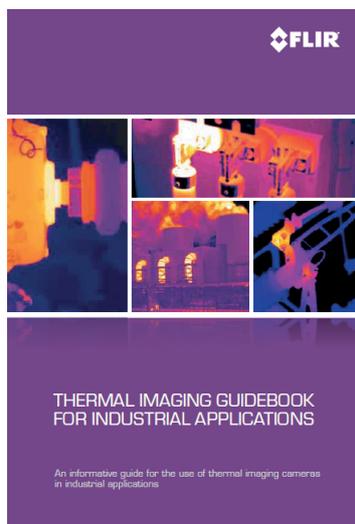
- Usa menos energía.
- Es más fiable, de modo que los costos de energía y los costos de producción generados por periodos de inactividad inesperados se reducen.
- Da la opción de incluir un programa de mantenimiento existente y sus sistemas relacionados para identificar y mantener las opciones de eficiencia energética.

8.2 TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO DE MOTORES

Las siguientes guías comerciales (de libre acceso) son muy recomendables considerando la información que brindan, aunque la ONUDI no puede recomendar marcas de equipos específicas.

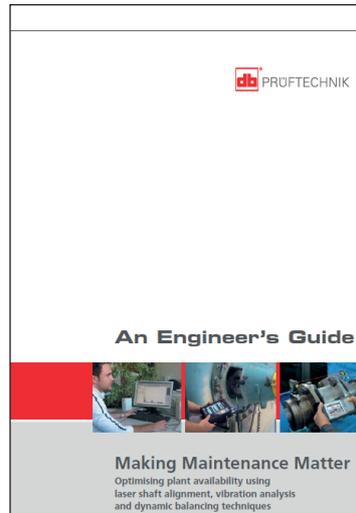
- Imágenes térmicas.

Thermal Imaging Guidebook for Industrial Applications de FLIR



- Análisis de vibraciones

An Engineer's Guide. Making Maintenance Matter



8.3 DECISIONES DE MANTENIMIENTO:

UN ENFOQUE ALTERATIVO PARA ESTIMULAR LOS AHORROS ENERGÉTICOS

Desde una perspectiva general de negocios, los beneficios de la mejora del mantenimiento, contando entre ellos el hecho de que se eviten fallas en las plantas -que a veces pueden tener altísimos costos- hacen que el mantenimiento sea más importante que la eficiencia energética. Como resultado, es mucho más probable que la industria esté dispuesta a gastar dinero en el mantenimiento en vez de en actividades de ahorros energéticos.

¿POR QUÉ HAY QUE HACER MANTENIMIENTO?

Finman y Laitner (2001) analizaron 77 estudios de casos sobre eficiencia energética, a partir de los cuales identificaron seis beneficios de los ahorros no energéticos:

- Reducción de los desechos.
- Reducción de las emisiones.
- Reducción de los costos de mantenimiento y funcionamiento.
- Mejoras de la productividad y la calidad.
- Mejoras del ambiente laboral.

Otras ventajas, como ahorro de espacio, reducción de los gastos de capital, mejora de la imagen pública y mejora del ánimo del personal.

En 52 de los estudios de casos se intentó poner un valor monetario a esas ganancias. La amortización promedio cayó de 4,2 años, teniendo en cuenta solamente los ahorros energéticos, a 1,9 si se consideran todos los ahorros. Aunque en muchos casos de estudios la amortización exclusiva de la alta energía está distorsionada porque apuntan a demostrar tecnologías nuevas e innovadoras, los resultados generales son válidos de todos modos. Otro documento (Laitner et al. 2001) muestra los resultados

que se obtienen al otorgar un valor monetario a los beneficios no energéticos de las acciones de ahorros energéticos posibles en el sector del hierro y el acero en los Estados Unidos. Se demuestra que, para los mismos criterios de amortización, si se tiene en cuenta los beneficios no energéticos, los ahorros que pueden obtenerse se duplican. Equivalen a ahorros energéticos adicionales de 1,9 GJ/tonelada de acero producida o de 170 PJ (1,6 x 10¹⁴ Btu) a los ahorros potenciales de todo el sector.

Algunos análisis de estudios en el Reino Unido mostraron también que en muchos casos no fueron en realidad los beneficios no energéticos los que fueron el factor crítico que impulsó la decisión cuando se consideró el proyecto por primera vez. Este hallazgo fue una de las razones principales detrás de la idea de tratar de poner en marcha una iniciativa que, en lugar de simplemente promover el uso eficiente de la energía, usara como propuesta primaria el beneficio de los ahorros no energéticos generados por el mantenimiento, sabiendo que los ahorros energéticos aparecerían posteriormente sin tener que mencionarlos.

EJEMPLOS DE CUESTIONES RELACIONADAS CON EL MANTENIMIENTO QUE AFECTAN LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Hay muchas pruebas provenientes de los trabajos de eficiencia energética en curso para sustentar la idea que detrás de la adopción de prácticas de ahorros energéticos suele haber un interés en el mantenimiento. Elegimos los siguientes ejemplos para mostrar que este fenómeno adopta distintos aspectos:

El *European Copper Institute* desarrolló con magros resultados una campaña en el Reino Unido para fomentar el uso de cables de mayor tamaño a fin de reducir las pérdidas de potencia. Empezó a tener éxito cuando expresó la misma medida como una manera de reducir la incidencia de fallas en la instalación mediante una mejor calidad del suministro eléctrico, con lo que consiguió despertar inmediatamente un gran interés de parte de muchas compañías.

A pesar de que los argumentos económicos respecto de los motores de alta eficiencia en el Reino Unido son buenos, no fueron lo suficientemente convincentes como para hacer que el mercado cambiara. En cambio, se captó un interés mucho mayor cuando se promocionaron las mejores prácticas a aplicar cuando un motor falla. Por lo tanto, es mucho más probable que la dirección de las empresas preste atención a los costos de marcha de los motores y a la importancia de la eficiencia.

Muchas personas de consultoría notaron que la compañía de una ingeniera o un ingeniero de mantenimiento de la instalación durante la evaluación de las oportunidades de ahorros energéticos del sitio da una visión mucho más profunda del verdadero estado de funcionamiento de la planta que si fueran acompañados por otra persona. Por ejemplo, el departamento de producción considerará un sistema de aire comprimido que siempre da suficiente aire a la presión correcta y de calidad adecuada como libre de problemas; pero el personal del departamento de mantenimiento podrá señalar que cada vez se necesitan más compresores o que hay que hacer esfuerzos de mantenimiento excesivos para proveer dicho servicio. Con mayor generalidad, otra cosa que puede ayudar a identificar todo tipo de discrepancias en la concepción de la gente acerca de los requisitos y del rendimiento de los sistemas, y que puede ayudarnos a encontrar información clave para encontrar soluciones de ahorros energéticos es detenerse y hacer preguntas a cualquier persona de la planta que se interese por un sistema determinado, en particular por los problemas que el sistema puede estar provocando.

Una de las ideas detrás de la guía del costo del ciclo de vida de los sistemas de bombeo de la *Euro Pump* y del *Hydraulic Institute* es la constatación de que los ahorros energéticos no alcanzaban para motivar a que la gente mejorara el diseño y el mantenimiento de los sistemas de bombeo. La base de la guía del costo del ciclo de vida es que cuando se diseña un sistema hay que tener en cuenta todos los costos imputables a un elemento de la planta a lo largo de su vida útil, como el costo de adquisición, de mantenimiento, energético, repuestos, costo de disposición, etc. El éxito de este enfoque más amplio

sugiere que cuando pensamos más allá de los meros ahorros energéticos tenemos más probabilidades de que haya estímulos para que se inicien acciones. Resulta interesante comprobar que cuando se analiza el impacto de un trabajo, se hace evidente que el riguroso análisis de ingeniería necesario para calcular correctamente el costo de la vida útil se pasa a menudo por alto porque no hay tiempo o porque faltan las habilidades necesarias. Consideramos esto como un estímulo extra para capacitar mejor al personal con relación al mantenimiento y la energía y sus costos asociados, ya que representan los datos más difíciles de calcular cuando se estudia el costo de la vida útil.

Cuadro 8. Vínculo entre los ahorros energéticos y los de mantenimiento

| | Práctica | Resultado |
|-----------------------------|--|--|
| Motores | Rebobinar | Un rebobinado de buena calidad reduce la eficiencia en tan solo 0,5 – 2,0% |
| | Lubricar | La sobre lubricación puede causar la falla prematura de los cojinetes y una pérdida de eficiencia de hasta el 1%. |
| | Alinear el eje | Un alineamiento correcto del eje causa apróx \$8/kW por grado de desalineamiento. |
| | Ajustar las correas | La eficiencia de las correas se deteriora un 10 – 15 % si no se las ajusta desalineamiento. |
| Sistemas de aire comprimido | Reparar las fugas | Normalmente, si los controles se ajustan para el volumen reducido requerido, se reducen los costos un 15 – 20%. Para reducir las fugas se puede dividir la red en zonas, quitar los ramales redundantes y mantener las juntas de los conectores y los cilindros. |
| | Trampas de drenaje de condensado | Las trampas de drenaje de condensado electrónicas son mucho más fiables y desperdician mucho menos aire que las trampas mecánicas o manuales. |
| | Service | Un service periódico mantiene el rendimiento y la eficiencia. |
| Sistemas de bombas | Mantenimiento del rodete | El mantenimiento de los rodetes y del revestimiento de las bombas mantiene la eficiencia. El equipo de seguimiento del estado de las bombas identifica el momento adecuado para reacondicionar las bombas. |
| | Control de la velocidad | Los controles de velocidad variable reducen el desgaste de las bombas, los cojinetes y las juntas. |
| | Variador de velocidad (ASD) | Los variadores pueden aliviar los golpes de ariete y sus efectos, y pueden prevenir la cavitación en determinadas circunstancias. |
| | Válvulas | Las válvulas de cierre sin retorno atascadas en los sistemas de bombas en paralelo desperdician mucha energía. |
| | Reparar las fugas | Reduce el consumo de agua y el consumo de energía. |
| Sistemas de ventiladores | Limpiar los filtros | Los filtros sucios causan una caída de la presión innecesaria. |
| | Limpiar los conductos | Los conductos sucios crean una fricción excesiva, lo que produce una caída de la presión innecesaria. |
| | Mantenimiento de las palas | Las palas del ventilador gastadas y sucias reducen la eficiencia. |
| | Amortiguadores | Los amortiguadores gastados o inutilizables aumentan el consumo de energía. |
| Sistemas de vapor | Mantenimiento de la caldera | Una caldera mal mantenida pierde un 5 – 10% de eficiencia. |
| | Sistemas de control de oxígeno y ASD en ventiladores de aire de combustión | Reduce la necesidad de monitorear y ajustar los controles del quemador, lo que ahorra combustible, reduce las emisiones y reduce el consumo de electricidad de los ventiladores. |
| | Reparar las fugas | Las pérdidas y las trampas de vapor defectuosas desperdician energía. |
| | Aislamiento de las tuberías | El mantenimiento de la integridad del aislamiento de las tuberías minimiza las pérdidas de calor de vapor. |

Por último, el cuadro 8 enumera algunas de las acciones comunes que tienen beneficios de ahorros tanto energéticos como de mantenimiento, para cinco ítems muy importantes de una planta industrial. La cantidad de superposiciones indica que existen muchas acciones de mantenimiento que generan ahorros energéticos directos y que de esta manera nos ayudan a justificar la promoción del mantenimiento como una manera de ahorrar energía.

LOS COSTOS DE LAS FALLAS

El costo de las fallas de mantenimiento explica por qué el personal directivo se interesa tanto por este tema, y por qué están dispuestos a gastar dinero para mejorar el rendimiento de la planta. Por ejemplo, el cuadro 9 muestra los costos típicos de una parada imprevista en algunas industrias.

Cuadro 9. Costo de la interrupción imprevista de equipos

| Industria | Pérdidas financieras por parada típicas |
|-------------------------------|--|
| Centro de cómputos | \$825.000 (Euros 750.000) por evento |
| Operaciones financieras | \$6.600.000 (Euros 6.000.000) por hora |
| Industria del vidrio | \$275.000 (Euros 250.000) por evento |
| Producción de semiconductores | \$4.180.000 (Euros 3.800.000) por evento |
| Acerías | \$386.000 (Euros 350.000) por evento |
| Telecomunicaciones | \$33.000 (Euros 30.000) por minuto |

Además de estos costos, los comentarios recogidos en seminarios de mantenimiento en el Reino Unido muestran que el personal directivo está cada vez más preocupado por mantener los equipos correctamente para cumplir con los reglamentos de salud y de seguridad, ya que los costos de perder un proceso judicial funcionan bien para disuadir las prácticas deficientes. Otras consecuencias de una falla del equipo, como mala calidad o retraso en la entrega de los productos, pueden poner en riesgo los negocios futuros de la empresa, por lo que se destacan como una preocupación mayor adicional.

EFICIENCIA GENERAL DE LOS EQUIPOS

La medida más utilizada por el personal directivo para evaluar el rendimiento de una planta en comparación con un ideal es la eficiencia general de los equipos (OEE). Veamos cual es la relación entre la eficiencia energética y los parámetros que intervienen en la OEE. La OEE tiene en cuenta todos los costos directos del rendimiento deficiente de una planta, y en general se define como:

$$\begin{aligned} \text{OEE} = & \text{Disponibilidad (Pérdidas por desperfectos + pérdidas de configuración y ajuste)} \\ & \times \text{tasa de rendimiento (Inactividad + Pérdidas por paradas menores)} \\ & \times \text{tasa de calidad (Pérdidas por reelaboración + Pérdidas de puesta en marcha)} \end{aligned}$$

Podemos observar que los costos de mantenimiento entre paréntesis nos resultan familiares. Esto es porque estos elementos generan pérdidas de energía. Estos costos ocultos pueden ser importantes. En el cuadro 10 se describen más detalladamente estas y otras causas de pérdidas de energía ocasionadas por fallas en las plantas.

Cuadro 10. Costos energéticos de las fallas en las plantas

| Efectos de los desperfectos inesperados | Costos energéticos relacionados |
|--|--|
| Reducción temporaria de la producción durante el desperfecto. | La energía esencial o básica necesaria para mantener los servicios esenciales se divide por menos producción, de manera que aumenta el consumo de energía. |
| Pérdidas de puesta en marcha | Mucha energía se pierde durante el tiempo que necesitan los procesos de altas temperaturas para calentarse. |
| Uso de métodos alternativos para recuperar la pérdida de producción. | Es posible que se usen métodos menos eficientes de producción, tal vez usando equipos viejos o que impliquen gastos de transporte adicionales. |
| La energía que usó para procesar el producto | Es posible que se haya gastado mucha energía para que un producto esté casi terminado y esta energía se perdió. |
| Disposición del producto dañado | Es posible que haya costos energéticos relacionados con la disposición física del producto rechazado. |
| Reparaciones urgentes de emergencia para volver a arrancar la planta | El personal de mantenimiento trata de volver a arrancar la planta lo más rápido posible, la rapidez es más importante que la calidad de reparación óptima y que la búsqueda de los mejores repuestos o kits de reemplazos. |
| Costos de reelaboración | Energía adicional que se usa para reelaborar el producto estropeado. |
| No hay tiempo para el trabajo menos urgente. | Se pierde el tiempo que se pudo haber usado para ahorros energéticos. |

El cuadro 11 muestra las distintas causas de los desperfectos en las plantas y los remedios para eliminar las causas. Como ya vimos, en el 85% de las causas más frecuentes, resulta evidente que las mejoras del mantenimiento repercuten positivamente sobre la eficiencia energética.

Cuadro 11. Cómo se pueden eliminar las interrupciones en las plantas

| Porcentaje de desperfectos/parados | Cómo se les puede eliminar |
|------------------------------------|---|
| >40% | Reacondicionamiento y en consiguiente, restauración del equipo a su estado estándar. |
| >20% | Aplicación de verificaciones de cuidados de los activos cotidianas y rutinas de mejores prácticas de las operaciones. |
| >25% | Por medio de la aplicación d un seguimiento del estado periódico y pertinente y de un mantenimiento planificado. |
| >15% | Por medio de la eliminación de las debilidades físicas de los equipos. |

CÓMO LAS MEJORES PRÁCTICAS DE MANTENIMIENTO PUEDEN AYUDAR A SUPERAR LOS OBSTÁCULOS NO ECONÓMICOS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Hasta el momento solo se mostró el claro vínculo entre la eficiencia energética y el mantenimiento. Pero, además de las características comunes de las medidas técnicas, hay otros aspectos de las mejores prácticas de mantenimiento que ayudan a superar algunas de las barreras no económicas comunes a los proyectos de ahorro energético que están en proceso de implementación:

CONSEGUIR EL APOYO DE OTRAS PERSONAS QUE TAMBIÉN PODRÍA BENEFICIARSE CON EL PROYECTO

Una buena manera de identificar otros beneficios consiste en hablar con otras personas de la planta, como con gente de mantenimiento o de producción que conozca bien el ítem en cuestión. Más aún, al hacer participar a otras personas o cuando podemos identificar qué cosas están en juego para esas personas, es más probable que apoyen nuestra propuesta.

INTEGRACIÓN DE LAS ACCIONES DE AHORROS ENERGÉTICOS CON LAS PARADAS DE MANTENIMIENTO PROGRAMADO

En equipos que funcionan semanas o meses entre paradas programadas, el costo de la producción perdida cuando se para, hace que solo se puede parar la planta para instalar y poner en servicio equipos de ahorros energéticos si se lo planifica con antelación como parte de una parada programada.

INTEGRACIÓN DE LAS BASES DE DATOS DE MANTENIMIENTO PERIÓDICO Y DE AHORROS ENERGÉTICOS

Una lista de todo el equipo esencial debe ser el documento básico del programa de gestión del mantenimiento, y es una base excelente para el programa de gestión de la energía.

INTEGRACIÓN DEL MANTENIMIENTO DE RUTINA Y DE LAS VERIFICACIONES DE LOS AHORROS ENERGÉTICOS

Las verificaciones de rutina de los equipos, como verificar que no haya fugas o hacer el seguimiento de la temperatura y la presión, etc. son elementos esenciales de las campañas de mantenimiento y de ahorros energéticos. Inferimos de esto que la persona que hace las verificaciones debe ser consciente de los dos motivos para hacerlas, y que, cuando sea necesario, modifique los detalles del trabajo para maximizar todos los beneficios de ahorros energéticos y de mantenimiento.

REVISIÓN DE LAS DEMANDAS DE SERVICIOS DEL SITIO

La expansión o la contracción de la producción total de la planta puede provocar desajustes entre los servicios que la planta produce y la demanda real, lo que constituye una causa muy común de ineficiencia. Un ajuste mejor minimiza los costos de mantenimiento a través de un mejor uso de las instalaciones existentes y a través de que se evitan los costos de mantenimiento de la parte de la planta que suministraba una capacidad que ya no se necesita. Por lo tanto, la reevaluación periódica de los servicios que el sitio debe prestar realmente debe formar parte de las mejores prácticas de mantenimiento y ahorros energéticos.

DISEÑO TENIENDO EN CUENTA EL MANTENIMIENTO

Diseñar equipos de modo que sean fáciles de mantener o que no necesiten mantenimiento puede reducir el consumo de energía.

UNA MANERA DE TRABAJAR

Una organización que enfoca el mantenimiento correctamente, porque tiene un sistema de gestión de mantenimiento que funciona bien y porque su personal tiene la actitud adecuada, está en una posición mucho más conveniente para implementar una campaña de ahorros energéticos que tenga éxito.

MEJORAR EL MANTENIMIENTO ES GRATIS

El análisis de estudios de casos de la conferencia Maintech en el Reino Unido de 2002 (Maintech 2002) muestra que, en cada uno de los cinco detallados ejemplos citados, no solo se obtuvieron beneficios ligados a la mejora del mantenimiento, sino que, además, los costos de mantenimiento general reales bajaron. Esto se debe a que el gasto adicional de una mejora del seguimiento y del mantenimiento preventivo se compensó ampliamente con la reducción del mantenimiento de urgencia, que es muy costoso. Con tantas empresas que quieren disminuir sus presupuestos de mantenimiento, la idea de que se puede mejorar gastando menos es una idea promocional muy atractiva. A continuación, resumimos los beneficios operacionales generales de esos estudios.

RESUMEN DE LOS AHORROS OBTENIDOS EN LA PRÁCTICA A TRAVÉS DE MEJORES PRÁCTICAS DE MANTENIMIENTO

- Lever Faberge aumentó su capacidad de producción en \$2,4 millones/año (£1,5 millones), incrementado la eficiencia general de los equipos (OEE) un 110%, al mismo tiempo que redujo los costos de mantenimiento un 31%.
- British Aerospace aumentó la eficiencia general de los equipos del 26% al 65%, mejoró la calidad un 10%, redujo el tiempo de inactividad un 10% y redujo los costos de los repuestos a la mitad en otra área.
- Blue Circle Cement redujo las averías un 67% y se ahorró casi el 20% del presupuesto de mantenimiento.
- Imperial Chemical Industries (ICI) redujo los gastos de mantenimiento un 20%, mientras que aumentó el rendimiento de sus procesos obteniendo una reducción de los costos de mantenimiento/tonelada de producto del 30%.
- Unilever logró un 30% de mejora en la productividad mientras que redujo los costos de mantenimiento un 30%, y redujo los defectos sustancialmente.

9

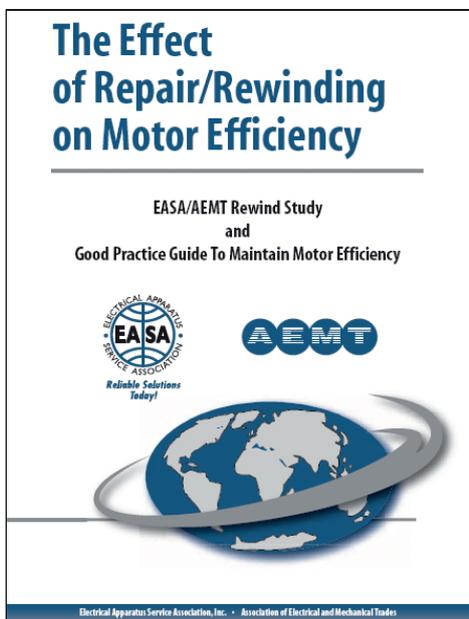
REPARACIÓN DE MOTORES

MEJORES PRÁCTICAS DE REPARACIÓN DE MOTORES

Al reparar un motor de inducción se perderá por lo general entre el 0,5 y el 2,0% de la eficiencia y se perderá la oportunidad de actualizarlo por un motor nuevo y más eficiente.

El primer paso es usar un taller de reparación de motores de buena calidad que adhiera a las mejores prácticas. Esto se describe en la sección *Good Practice Guide* de la siguiente publicación:

Recurso 2 - *The Effect of Repair/Rewinding on Motor Efficiency (EASA/AEMT)*



Los siguientes capítulos son de particular interés:

Directivos y gerentes de energía: *Executive Summary* (P1-3)

Personal de mantenimiento y talleres de reparación de motores: *Good Practice Guide* (P2-3)

Cuando un motor falla, existe también la oportunidad de cambiarlo por un motor más eficiente, y de obtener así ahorros energéticos adicionales. Sin embargo, las consideraciones económicas dependen mucho del sitio y del motor, así que se sugiere una política de gestión de motores que facilite la toma de la mejor decisión y que el personal de mantenimiento esté autorizado a gastar más por anticipado para generar ahorros energéticos de largo plazo.

CONSIDERACIONES PARA LA INSTALACIÓN DE UN MOTOR NUEVO

Hay muchas consideraciones prácticas que se han de tener en cuenta al considerar cambiar el motor por uno nuevo:

- Posición y tamaño de los agujeros de montaje.
- Longitud del motor.
- Corriente de arranque.
- Deslizamiento (y, por ende, velocidad de marcha).
- Altura del eje.
- Diámetro del eje.

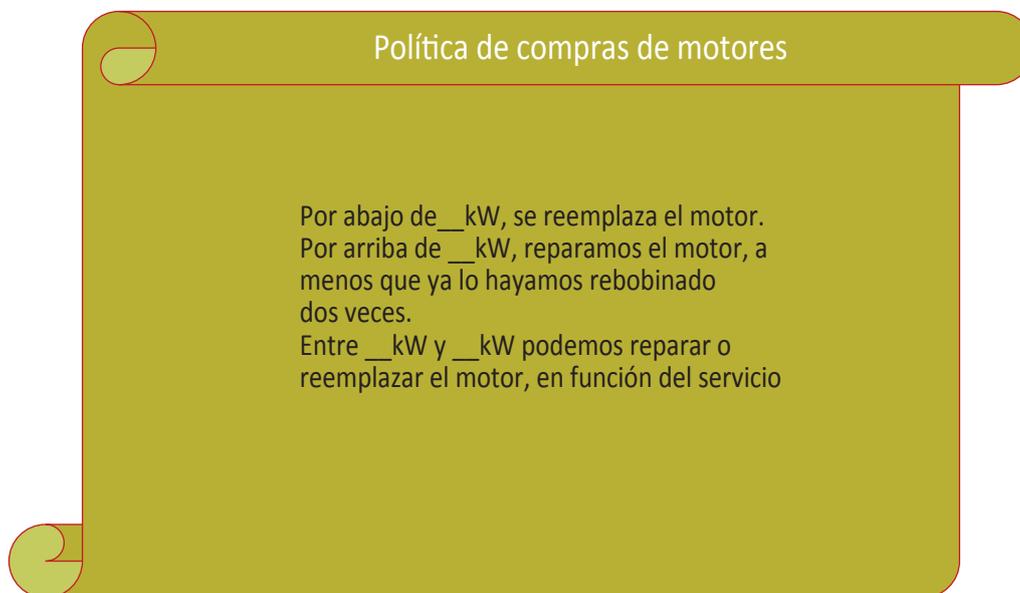
MEJORAMIENTO DE UN MOTOR ANTIGUO

Un buen taller de reparación y un usuario informado pueden alterar el devanado estático ligeramente para obtener, por ejemplo, más eficiencia o un par de arranque ligeramente mayor. Pero esto depende de que se tenga un entendimiento detallado de la carga, y solo debería hacerse si se cuenta con personal experimentado.

MODELO DE POLÍTICA DE ADQUISICIÓN DE MOTORES

Lo ideal sería que las organizaciones tuvieran una política de compras sencilla que todos pudieran entender. Podría abarcar puntos como los siguientes:

Figura 41. Ejemplo de política de compras de motores

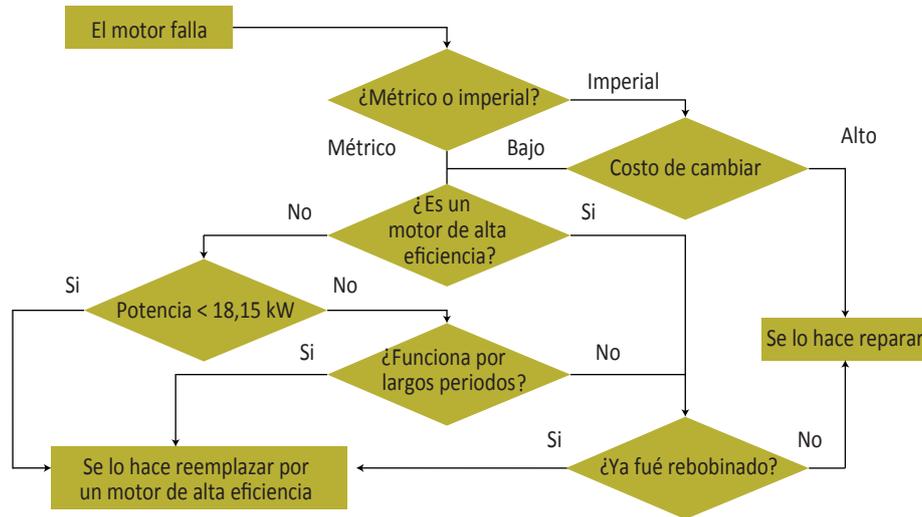


Mientras más simple, mejor. Un poco de flexibilidad es necesaria, pero no demasiada, porque si no el personal va a ignorar la política cuando lo crea conveniente.

Algunos proveedores de equipos ofrecen cuadros de decisión como el anterior (AAE: arriba, abajo, entre), como se observa en la figura 41, pero hay que asegurarse de que el cuadro refleja las circunstancias particulares de nuestra empresa.

Otra decisión importante que se debe considerar es el remplazo o reparación de un motor. una ayuda para facilitar esta decisión se muestra en la figura 42.

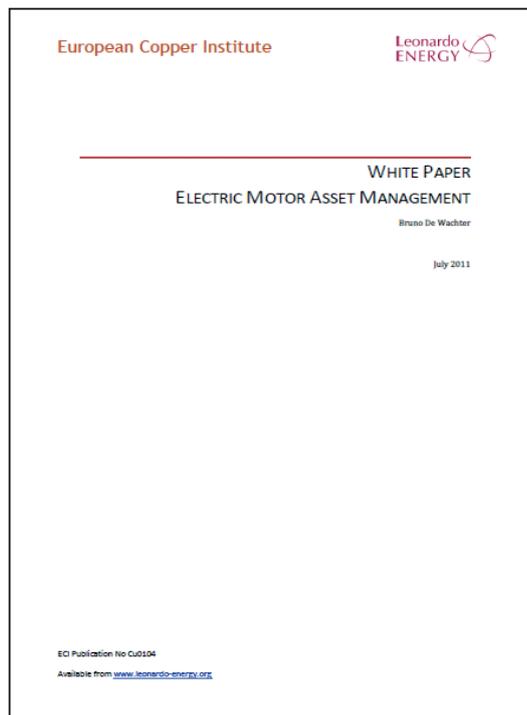
Figura 42. Ejemplo de cuadros de ayuda para facilitar la decisión de reemplazar o reparar



Encontrará más información sobre la decisión de reemplazar o reparar en el *White Paper* del *European Copper Institute* a continuación:

Recurso 3 - White Paper: Electric Motor Asset Management, ECI, 2011

Contiene una hoja de cálculo y permite que se calculen las consideraciones económicas de varias opciones de reparar o reemplazar.



No es sencillo identificar un taller de reparación de calidad, pero algunos de los indicadores a tener en cuenta son los siguientes:

- ¿Qué tipo de motores pueden rebobinar?.
- ¿Qué calibres de cables tienen en existencia?.
- Si no tienen variedad o si tienen poco cable, puede ser que no puedan cumplir con la resistencia del estátor o con la cantidad de vueltas.
- ¿Tienen un horno de quemado controlado? ¿Qué otras técnicas utilizan para extraer el devanado?.
- ¿Cuál es el grado de experiencia del personal?.
- ¿Qué capacitación reciben el personal?.
- ¿Hay un sensor del núcleo para verificar que el núcleo no esté dañado?.

10

¡VENDA EL PROYECTO! - CÓMO GANAR ADEPTOS PARA SU IDEA

La eficiencia energética se percibe como:

- Voluntaria, a discreción.
- Menos importante porque tiene un valor bajo.
- Técnicamente riesgosa.

No alcanza con tener una oportunidad técnicamente buena y con preparar un buen estudio financiero. Se necesita más para llevarla a cabo.

Algunas de las objeciones comunes son:

NO ESTAMOS CONVENCIDOS PORQUE...

- ... el problema no es claro.
- ... no entendemos la solución que propone.
- ... no hay pruebas de que va a funcionar.
- ... no estamos de acuerdo con sus suposiciones.

NOS GUSTA EL PROYECTO, PERO...

- ... pareciera ser que cuando se haga la instalación habrá interrupciones.
- ... no estamos seguros de por cuánto tiempo vamos a conservar el edificio/proceso/equipo.
- ... el personal no lo va a aceptar.
- ... no disponemos del dinero para financiar el proyecto.
- ... necesitamos el personal necesario para el proyecto para otras tareas.
- ... uno de nosotros tiene una mejor idea.
- ... ¿por qué no hizo antes algo para resolver este tema?.

¿CÓMO SE PUEDEN SUPERAR ESTOS PROBLEMAS?

A continuación, les presentamos un texto que es esencial para todos los que tienen que conseguir financiamiento para proyectos de eficiencia energética:

Recurso 4 - Making the business case for a carbon reduction project, (UK Carbon Trust)



¿A QUIÉN HAY QUE CONVENCER?

Piense en las personas a las que quiere convencer: ¿qué cosas tienen en cuenta, qué motivaciones tienen, qué forma tiene que tener la información que tengamos que presentarles?

¿Es posible que logremos que participen del proyecto desde el principio para que lo comprendan bien y para asegurarnos de que nos apoyarán?

A menudo, también es necesario contar con el apoyo de colegas a los que nuestros proyectos podrían afectar, así que es importante consultarlos con el mismo nivel de detalle.

IDENTIFICAR A LOS PARTIDARIOS DE NUESTRO PROYECTO

Es muy valioso poder identificar a las personas que pueden apoyar nuestro trabajo para allanar el camino para conseguir la financiación necesaria.

No solamente pueden ayudarnos a presentar nuestro proyecto de la mejor manera, sino que también pueden aportar una mejor comprensión de otras cuestiones empresariales que también tienen que ver con el proyecto. También pueden ayudarnos a sondear a otras partes interesadas que necesitan que se los consulte y se les dé tranquilidad.

SU CREDIBILIDAD

Cuando hay que desarrollar un caso para conseguir financiación o para que se hagan cambios, resulta mucho más sencillo si la gente nos conoce por promocionar ideas razonables y efectivas para ahorrar dinero, energía o carbono. Este es uno de los motivos por el cual decimos que la "realización de un estudio de viabilidad" es un proceso continuo antes que un evento puntual. En definitiva, el personal directivo superior tendría que pedirle a usted que tenga ideas, en vez de que usted tenga que tratar de convencerlos.

Estratégicamente, es razonable elegir algunos “resultados fáciles” con los que se ahorre mucho con poca inversión y poco esfuerzo. El siguiente paso consiste en promocionar este éxito, cuantificando lo más posible.

Para hacerse una buena fama necesitará algún tiempo, pero cuidado, porque un solo fracaso puede estropear su reputación por mucho tiempo, así que respete las reglas siguientes:

- Evalúe los proyectos con diligencia y nunca promueva algo de lo que no está seguro.
- Nunca haga afirmaciones exageradas.
- Trate de dejarse margen para dar más de lo que prometió.
- Cuando obtenga aprobación para algo, impleméntelo sin dilación y haga todo lo posible para garantizar que salga bien.
- Manténgase al tanto de las novedades - conviértase en una autoridad en el tema.
- Asegúrese de que las personas sepan qué es lo que logró y registre todos los logros.

GESTIÓN DE LA ENERGÍA

11.1 LA IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS DE GESTIÓN DE LA ENERGÍA

Una eficiencia energética industrial sostenible requiere que la eficiencia energética esté integrada en las prácticas de gestión de todos los días, así como sistemas de mejora continua. Para lograr esto, se necesita un enfoque sistemático y la participación activa de la alta dirección.

Los sistemas de gestión de la energía (SGEn) proporcionan:

- Un marco para comprender los usos significativos de energía.
- Parámetros para vigilar y cuantificar el rendimiento energético respecto al consumo de energía.
- Planes de acción para mejorar continuamente el rendimiento energético.
- Documentación para apoyar y demostrar las mejoras del rendimiento energético a lo largo del tiempo.

A un programa **permanente** eficaz para identificar e implementar con éxito oportunidades de ahorros energéticos le conviene mucho que la organización tenga en funcionamiento un sistema de gestión de la energía correcto. Por otra parte, el programa refuerza la efectividad del sistema.

Un SGEn hace que a la dirección y al personal les resulte más fácil aprobar e implementar inversiones en eficiencia y revisar su rendimiento real.

Algunos otros beneficios de los sistemas de gestión de energía son:

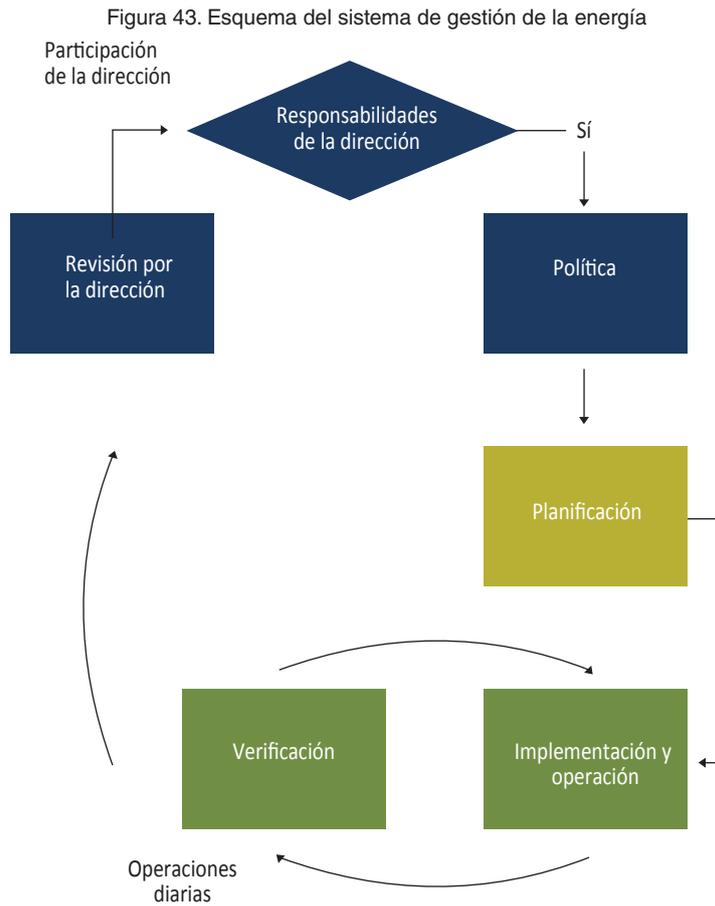
- Contribuyen a que la dirección y la empresa cumplan las obligaciones jurídicas y los requisitos en materia de notificación.
- Las credenciales verdes o de bajas emisiones de carbono pueden contribuir a obtener ventajas competitivas.
- Mejores condiciones de trabajo y de productividad.

La gestión de la energía consiste en la realización de acciones organizativas, técnicas y comportamentales que responden a sólidas consideraciones económicas con el objetivo de mejorar el rendimiento energético de la organización.

La gestión de la energía implica que hay que prestar atención a la energía de manera sistemática con el objetivo de mejorar continuamente el rendimiento energético de la organización y de mantener las mejoras logradas. Garantiza que la organización atraviese continuamente el ciclo de desarrollo de la política (incluyendo la evaluación de los objetivos), planificación de acciones, implementación de acciones y verificación de resultados, revisión de los avances y actualización de la política y de los objetivos, según sea necesario.

LA GESTIÓN DE LA ENERGÍA NO ES UN PROYECTO ÚNICO:
ES UN PROGRAMA PERMANENTE Y UNA MANERA DE HACER LAS COSAS.

La figura 43 a continuación muestra todos los elementos principales de un sistema de gestión de la energía.



REFERENCIAS

1. **De Almeida, Anibal, Ferreira, J . T . E . Fernando y Fong, João.** Standards for efficiency of electric motors - Permanent magnet synchronous motor technology. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2011.
2. **Fassbinder, Stefan.** *Saving Energy with High Efficiency Motors*. s.l. : Leonardo Energy, 2007.
3. *The design of high-efficiency line-start motors.* **Knight, A. M. and McClay, C. I.** 6, s.l. : IEEE, Nov-Dec 2000, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, pp. 1555-1562.
4. **Baoming, G, de Almeida, A y Ferreira, Fernando J.T.E.** Design of Transverse Flux Linear Switched Reluctance Motor. *IEEE Transaction on Magnetics*. January 2009, Vol. 45, No. 1, págs. 113-119.
5. *Improving Motor and Drive System Performance: A Sourcebook for Industry*. s.l. : US Department of Energy, 2008.
6. *Electric Motors Energy Efficiency Reference Guide*. s.l. : Natural Resources Canada.
7. **Office of Energy Efficiency of Natural Resources Canada.** *Energy Efficient Motor Systems Assessment Guide*. s.l. : CIPEC, 2004.
8. *IEC 60034-30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors.* **International Electrotechnical Commission**. 2010.
9. *IEC 60034-31: Guide for the selection and application of energy efficient motors including variable-speed applications.* **International Electrotechnical Commission**. 2010.
10. *IEC 60034-2-1: Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests - excluding machines for traction vehicles.* **International Electrotechnical Commission**. 2007.
11. **de Almeida, Anibal T., et al., et al.** *EuP Lot 11 Motors, Ecodesign Assessment of Energy Using Products*. s.l. : ISR-University of Coimbra for EC-DG-TREN, 2008.
12. Commission Regulation (EC) No 640/2009 of 22 July 2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for electric motors .
13. **Balducci, Anthony.** EPACT Legislation - The United States experience of minimum efficiency standards for induction motor. *Energy Efficiency Improvements in Electric Motors and Drives*. s.l. : Springer - Venlag, 1997. ISBN 3-540-67489-6.
14. **Brunner, Conrad y Waide, Paul.** *Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems*. s.l. : International Energy Agency, 2011.
15. **Jochem, E.** Lecture on Energy Economics and Policy. Zurich : ETH (Swiss Federal Institute of Technology), 2008.
16. **al, A. de Almeida et.** *Improving the penetration of Energy-Efficient Motors and Drives*. s.l. : European Commission, 2000.

TEXTOS Y RECURSOS ADICIONALES

13.1 LIBROS DE TEXTO

- *Energy-Efficient Motor Systems – A Handbook on Technology, Programs, and Policy Opportunities*, Steve Nadel, Michael Shepard, Steve Greenberg, Gail Katz, Anibal T. de Almeida, ACEEE
- *Energy Efficiency Improvements in Electric Motors and Drives*, Anibal T. de Almeida, Paolo Bertoldi, Hugh Falkner (Editores), Springer, 2000.
- *Electric Motors and Drives – Fundamentals, Types and Applications*, Austin Hughes, BH Newnes, 2ª edición

13.2 DOCUMENTOS TÉCNICOS

- Fernando J. T. E. Ferreira y Aníbal T. de Almeida, “*Induction Motor Downsizing as a Low-Cost Strategy to Save Energy*”, *The Journal of Cleaner Production*, Elsevier, aprobado para publicación, noviembre de 2011.
- Fernando Ferreira, João Fong y Anibal T. de Almeida, “*Eco-analysis of “Variable-Speed Drives for Flow Regulation in Pumping Systems”* *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, n.º 6, junio de 2011.
- Ge Baoming, Fang Zheng Peng, Anibal T. de Almeida y Haitham Abu-Rub, “*An Effective Control Technique for Medium-Voltage High Power Induction Motor Fed by Cascaded Neutral Point Clamped Inverter*”, aprobado para publicación en *IEEE Transactions in Industrial Electronics*, vol. 57, n.º 8, agosto de 2010;
- Ge Baoming, A. de Almeida, y J. T. E. Ferreira, “*Design of Transverse Flux Linear Switched Reluctance Motor*”, *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 45, n.º 1, pág. 113-119, enero de 2009.
- F. Ferreira and A. de Almeida: “*Novel Multi-Flux Level, Three-Phase, Squirrel-Cage Induction Motor for Efficiency and Power Factor Maximization*”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, n.º 1, marzo de 2008, pág. 101-109;
- F. Ferreira, A. De Almeida, “*Method for In-Field Evaluation of the Stator Winding Connection of Three-Phase Induction Motors to Maximize Efficiency and Power Factor*”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, n.º 2, junio de 2006;
- A. de Almeida, F. Ferreira y D. Both, “*Technical and Economical Considerations in the Application of Variable Speed Drives with Electric Motor Systems*”, *IEEE Industrial Applications Transactions*, vol. 41, n.º 1, pág. 188-199, enero-febrero 2005.

13.3 NORMAS

CLASIFICACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LOS MOTORES

- *IEC 60034-2-1 (Ed. 2.0): Máquinas eléctricas rotativas. Parte 2-1: Métodos normalizados para la determinación de las pérdidas y del rendimiento a partir de ensayos (excepto las máquinas para vehículos de tracción)*, de 2014, que describe los métodos para determinar la eficiencia de los motores a partir de ensayos.
- *IEC 60034-30-1 (Ed.1.0): Máquinas eléctricas rotativas. Parte 30: Clases de rendimiento para los motores trifásicos de inducción de jaula de velocidad única (código IE)*, de 2014, que define las clases de energía para los motores de inducción.
- *IEC 60034-4: Rotating electrical machines – Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests*
- *IEC 60034-19: Rotating electrical machines - Part 19: Specific test methods for d.c. machines on conventional and rectifier-fed supplies*
- *IEC 60034-1: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 1: Clasificación y rendimiento*
- *IEC 60034-2-2: Rotating electrical machines - Part 2-2: Specific methods for determining separate losses of large machines from tests - Supplement to IEC 60034-2-1*, de 2010
- *IEC TS 60034 – 25 (Ed. 2): Rotating electrical machines - Part 25: Guidance for the design and performance of a.c. motors specifically designed for converter supply*, de 2007
- *IEC 61800-2: Adjustable speed electrical power drive systems - Part 2: General requirements rating specifications for low voltage adjustable frequency a.c. power drive systems*

SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE MOTORES

- *IEC 60034-31 (Ed.1.0): Rotating electrical machines - Part 31: Selection of energy-efficient motors including variable speed applications - Application guide*, de 2010
- *IEC 60072-1: Dimensions and output series for rotating electrical machines - Part 1: Frame numbers 56 to 400 and flange numbers 55 to 1080*
- *IEC 60034-17: Rotating electrical machines — Part 17: Cage induction motors when fed from converters - Application guide*
- *NEMA MG10, Energy Management Guide for Selection and Use of Fixed Frequency Medium AC Squirrel-Cage Polyphase Induction Motors*
- *NEMA MG11, Energy Management Guide for Selection and Use of Single-Phase Motors*

13.4 OTROS DOCUMENTOS ÚTILES

- *Improving Motor and Drive System Performance - A Sourcebook for Industry*, DOE/EERE/ Industrial Technologies Program, 2008
- *Energy- efficient motor systems assessment guide*, CIPEC
- *Energy Efficiency Reference Guide Electric Motors*, NRCAN
- *Energy Management for Motor Driven Systems*, USDOE

