

**CONVERTIDORES DE
FRECUENCIA**

**Ahorro energético en el uso
de Motores Eléctricos**

GUÍA DE USUARIO

OMRON

1-1 Introducción

Los motores eléctricos son los principales consumidores de electricidad en plantas industriales y locales comerciales en España. Ocasionan un consumo de energía de casi la mitad de la energía total usada en España y prácticamente dos tercios de la electricidad consumida en la industria.

El bajo coste de un motor puede resultar engañoso. Suponiendo que un motor de inducción de un tamaño medio de 11KW puede costar entorno a 75.000 ptas, los costos de funcionamiento del motor a lo largo de diez años pueden ser superiores a 7 millones de pesetas. La factura de electricidad de un motor por cada mes de funcionamiento puede ser mayor que su precio de compra.

Aunque el coste del motor es a veces bastante bajo, los costes debidos a su larga vida de funcionamiento indican que es importante considerar cuidadosamente las opciones que existen cuando se sustituya el motor o cuando se instalen nuevos equipos.

Los factores que ayudan a ocultar el elevado coste de los motores son varios: Los motores de inducción son fiables, normalmente silenciosos y suelen instalarse por toda la planta. La gran cantidad de motores trabajando en la mayoría de plantas industriales también provoca que el usuario tenga dificultades para identificar las mejores opciones para ahorrar energía.

La elección de técnicas y equipos para reducir el consumo de energía por los motores puede resultar dificultosa debido a que existe una amplia gama de opciones, desde medidas más baratas como conmutadores, hasta otras más sofisticadas como **Convertidores de Frecuencia**.

La elección de la instalación de un **Convertidor de Frecuencia** como método de ahorro energético supone:

- Reducción del consumo.
- Mejor control operativo, mejorando la rentabilidad y la productividad de los procesos productivos.
- Minimizan las pérdidas en las instalaciones.
- Ahorro en mantenimiento (el motor trabaja siempre en las condiciones óptimas de funcionamiento).

Todas estas ventajas repercuten finalmente en las instalaciones industriales, consiguiendo que la **amortización** de las mejoras realizadas se produzca en un corto periodo de tiempo (entorno a dos años o incluso menos), y **prolongando** también la vida útil de los motores utilizados.

En un entorno industrial con una factura en electricidad de 36 millones de pesetas al año, una media de 24 millones se gastan en el funcionamiento de los motores. Se pueden conseguir unos ahorros anuales de 800.000 pesetas usando motores de alto rendimiento y entorno a los 3 millones de pesetas o más instalando un **Convertidor de Frecuencia OMRON**.

Con este ensayo se pretende dar una idea general de cuales son los posibles métodos a aplicar en el ahorro energético, así como los parámetros a tener en cuenta para conseguir un ahorro óptimo.

En la siguiente lista se muestran los puntos a tener en cuenta a la hora de plantear modificaciones en las instalaciones actuales con el fin de conseguir un ahorro de energía:

Lista de ahorro de energía

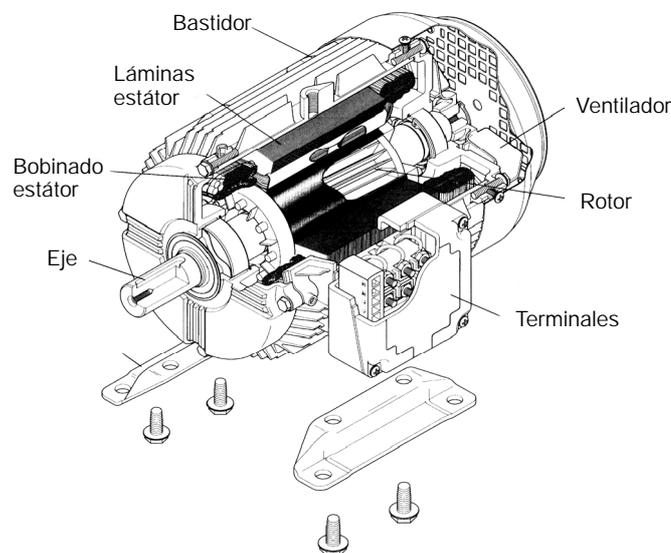
1. ¿Se necesita aún el equipo?
 - Comprobar que los requisitos de la instalación no han eliminado la necesidad del equipo.

2. Apagando el motor.
 - Temporizar las conmutaciones de acuerdo a un programa fijo o a un horario.
 - Controlar las condiciones del sistema, por ejemplo alta o baja temperatura, y desconectar el motor cuando no se necesite.
 - Percibir la carga del motor de modo que el motor esté apagado cuando no deba trabajar.
 - Reducción de la carga del motor.
 - No es útil optimizar el motor si lo que éste está controlando es ineficiente.
 - ¿El sistema realiza un trabajo útil y necesario?
 - ¿La transmisión entre el motor y el equipo manejado es eficiente?
 - ¿El equipo impulsado es eficiente?
 - ¿Los programas de mantenimiento son adecuados?
 - ¿Se han minimizado las pérdidas debidas a tuberías, conductos, aislamiento, etc. ?
 - ¿Es efectivo el sistema controlado?
3. Minimizar las pérdidas en el motor
 - Usar motores de alto rendimiento cuando sea factible.
 - Cuando un motor falla, asegurarse de que se les da el cuidado adecuado en el proceso de reparación para minimizar las pérdidas de energía.
 - Evitar el uso de motores excesivamente sobredimensionados.
 - Considerar la reconexión permanente en estrella como un sistema sin coste de reducir las pérdidas de motores con cargas ligeras.
 - Comprobar que el desequilibrio de voltajes, tensiones altas o bajas en la fuente de alimentación, distorsión de armónicos o un factor de potencia escaso no estén causando pérdidas excesivas.
4. Reducción de la velocidad de la carga
 - En aplicaciones con bombas o ventiladores, (aplicaciones clasificadas dentro del grupo llamado de relación cuadrática como más adelante se explicará en este ensayo), una pequeña reducción en la velocidad puede producir ahorros de energía sustanciales.
 - Instalar en sus aplicaciones Convertidores de Frecuencia OMRON donde se requieran varias velocidades discretas o un número infinito de velocidades. Los beneficios y el gran ahorro de energía derivados del uso de Convertidores hace que sean la elección más acertada para aplicaciones en las que se efectúa control de velocidad.
 - Aunque el uso de motores de varias velocidades o el cambio del radio de la polea (cintas transportadoras) han sido métodos comúnmente utilizados hasta el momento, las ventajas que presenta el uso de los Convertidores de Frecuencia han permitido que este método sea el de uso más extendido.

1-2 Motores de inducción de corriente alterna

La mayoría de los sistemas eléctricos en la industria son movidos por motores de inducción. La forma más común es el motor de inducción en jaula de ardilla, de bajo coste y fiable. Los motores de diferentes velocidades se consiguen variando el número de polos.

Los principales elementos de un motor de inducción en jaula son el estátor y el núcleo del rotor (un conjunto de láminas de hierro), un bobinado aislado del estátor y los conductores del rotor formados por una jaula de aluminio dentro del núcleo del rotor. En todos los motores de inducción cerrados como el mostrado en la figura, la ventilación se realiza mediante un ventilador montado en el eje que hace circular el aire por el armazón, enfriando así sus superficies externas.



Corte transversal en un motor de inducción de jaula.

1-2-1 Pérdidas en el motor.

Las pérdidas de potencia en los motores de inducción se pueden agrupar en dos componentes principales. Estos son:

Pérdidas fijas, es decir, independientes de la carga del motor:

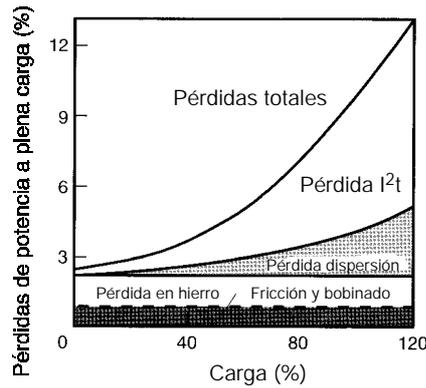
- pérdidas en el hierro o magnéticas en el núcleo del estátor y del rotor.
- pérdidas por fricción y por el bobinado.

Pérdidas proporcionales a la carga del motor:

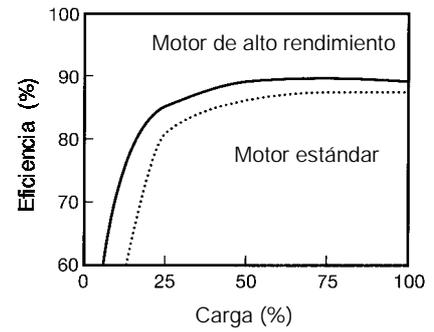
- pérdidas resistivas (I^2R) o del cobre en los conductores de estator y rotor.
- pérdidas de dispersión causadas por componentes o flujo de dispersión.

En las figuras siguientes se muestra una composición típica de las pérdidas del motor y su variación con la carga. Aunque las pérdidas se incrementan con el motor en carga, son menos significativas en motores con cargas elevadas.

Estas dos gráficas son importantes para comprender cómo seleccionar motores para obtener menores costes de energía.

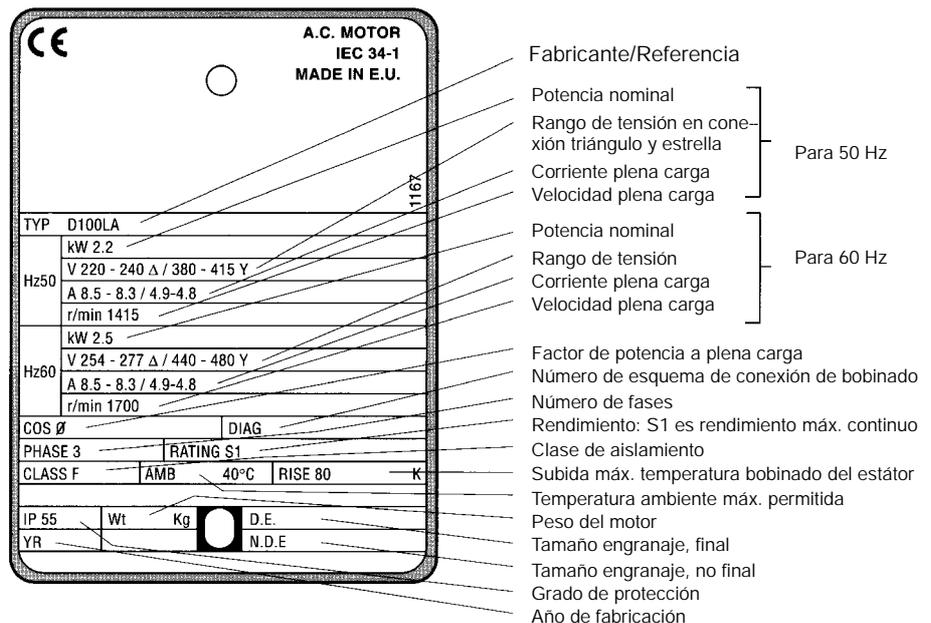


Pérdidas de inducción de jaula de ardilla.



Variación de rendimiento en un motor estándar de carga y otro de alto rendimiento de 7.5 kW

La figura siguiente muestra las especificaciones que se dan en una placa nominal típica. El rendimiento no se muestra generalmente en la placa, pero esta información puede obtenerse del fabricante o consultando en las hojas de características.



La potencia estimada de un motor es la potencia en el eje, es decir, la potencia mecánica útil que puede proporcionar para hacer girar a la carga. Pero como el motor tiene pérdidas, la potencia obtenida por el motor a plena carga será mayor que la estimada en el eje. Por ejemplo, a plena carga, un motor de 30 KW que tiene un rendimiento del 92.5% entregará $30 / 0.925 = 32.4$ KW.

1-2-2 Calidad de la alimentación.

Una mala calidad de alimentación, debido a factores tales como distorsión de armónicos, desequilibrio de tensiones o especialmente a altos o bajos voltajes, pueden provocar un efecto perjudicial en el consumo de potencia del motor.

1-3 Parando el motor

La forma más sencilla de reducir el consumo de energía es apagar el motor cuando no se necesite. Hay una variedad de formas de controlar el apagado que a menudo son específicos de la aplicación.

1-3-1 Técnicas de parada

Las técnicas disponibles para desconectar la maquinaria incluyen:

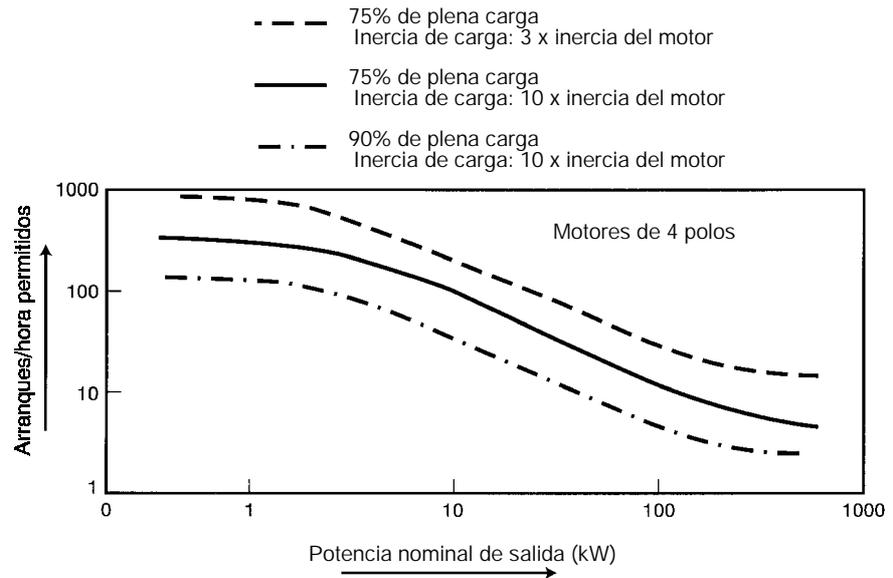
- **Desconexión manual.** Este método es el más barato, pero puesto que se confía al operario, es el menos fiable. Las razones que se pueden dar para esto son: simplemente un olvido, ninguna persona está al cargo del equipo, y resulta poco apropiado tener que esperar a que el equipo arranque de nuevo.
- **Adaptaciones,** es decir, un extractor o ventilador conectado solamente cuando un centro de carpintería o equipos de soldadura están encendidos.
- **Control 'bang-bang'.** Antes de poner en funcionamiento una máquina ininterrumpidamente con parte de la carga, permitirle arrancar o parar dentro de unos límites superior e inferior, por ejemplo, probar un gran depósito de agua para permitir a una bomba hacer un ciclo encendido/apagado que use un sistema de recirculación o un estrangulado
- **Tiempo de conmutación.** Fijar un tiempo de conmutación para asegurar que el equipo está encendido sólo cuando sea necesario.
- **Sucesión de múltiples cargas en el motor,** por ejemplo compresores de aire o refrigeración. La selección óptima de máquinas en una instalación múltiple es necesaria para alcanzar la presión o temperatura deseada. Buscando máquinas de diferentes prestaciones para encontrar las especificaciones deseadas, se puede evitar una operación ineficaz con una parte de la carga – o incluso sin carga. Algunos controladores pueden también secuenciar el uso de las máquinas para equiparar el desgaste.
- **Percepción de la carga.** Muchos motores pasan largos periodos de tiempo funcionando sin carga útil, pero podrían estar produciendo pérdidas considerables en reductoras, enganches, correas, volantes u otros elementos de transmisión. Hay controladores que detectan que el motor está funcionando sin carga y después de un tiempo preseleccionado en ese estado desconectan el motor.

1-3-2 Desgaste de un motor con arranques frecuentes.

Arrancar y desconectar los motores con mucha frecuencia puede ser una forma sencilla de ahorro de energía, pero arranques frecuentes incrementan el desgaste en correas de transmisión y en rodamientos, mientras que los sobrecalentamientos debido a las elevadas corrientes de arranque pueden acortar la vida del sistema de aislamiento del motor.

La figura siguiente muestra las frecuencias de arranque recomendadas para motores de cuatro polos. Los límites de las frecuencias de arranque son menores para cargas con altas inercias, para motores que trabajan casi a plena carga y para motores de alta velocidad (dos polos). Se pueden calcular el motor y las inercias de la carga con los datos de que dispone el fabricante, pero en la práctica, la inercia de la carga es normalmente mucho mayor que la inercia del motor.

Si la frecuencia de arranque no se conociese cuando el controlador está instalado, se recomienda que el sistema esté controlado con extremo cuidado durante el período inicial de operación para asegurar que la frecuencia de arranque está dentro de las especificaciones del fabricante. En la figura se muestra que los motores más grandes tienen límites menores de frecuencias de arranque.



1-4 Reducción de la carga del motor

Cuando se examina la eficacia de un sistema gobernado por un motor, la primera cuestión debería ser si la carga controlada por el motor (es decir, el resultado del trabajo que produce el eje del motor) puede ser reducida.

También es aconsejable plantearse si el equipo manejado y la fuerza que transmite el motor son eficientes antes de realizar la optimización del motor y los elementos de control.

Las siguientes secciones aconsejan sobre las principales maneras de reducir la carga en el motor.

1-4-1 Opciones de ahorro de energía en las aplicaciones comunes con motores.

Bombas.

- Seleccionar una bomba con un buen rendimiento y hacerla operar cercana a sus características normales y críticas.
- Si permanece a baja carga, instalar un pequeño impeller o sustituir el existente.
- Prestar especial atención a bombas en paralelo – añadiendo más bombas podemos hacer que el sistema sea menos eficiente progresivamente.
- Minimizar el número de codos en las tuberías.
- Considerar la mejora del rendimiento de las bombas usando revestimientos de baja fricción.
- Usar siempre tuberías de baja fricción y considerar la renovación de las tuberías viejas.
- Comprobar que las entradas de presión de las bombas están correctas.
- Realizar el mantenimiento de la bomba. Sin mantenimiento, el rendimiento de la bomba podría disminuir un 10% de cuando era nueva.
- Para grandes bombas, establecer un programa para calcular el tiempo óptimo de restauración.

Ventiladores.

- Elegir un ventilador con un buen rendimiento.
- Conservar los filtros limpios para minimizar las caídas de presión.
- Limpiar las aspas con regularidad.
- Evitar las caídas de presión innecesarias en los conductos.
- Adecuar los reguladores para sellar los sistemas de extracción en la maquinaria nueva.
- Instalar un control para encender el ventilador sólo cuando sea necesario.
- Utilizar sistemas para reducir la velocidad del ventilador cambiando los tamaños de las poleas.
- Cuando haya varios ventiladores, encenderlos o apagarlos para responder a los requerimientos.

Compresores.

- Tener en cuenta las alternativas a los compresores, por ejemplo usar electricidad en lugar de componentes neumáticos.
- Buscar el tamaño adecuado de compresor. Si se necesitan varios compresores, utilizar un controlador/secuenciador.
- Considerar la instalación de un pequeño compresor para usarlo durante los periodos de baja exigencia.
- Realizar el mantenimiento regularmente, evitando el uso de piezas de baja calidad.
- Producir la presión más baja posible.
- Aprovechar el calor producido por los compresores para calentar agua.
- Comprobar periódicamente los escapes y repararlos rápidamente.
- Mapear el sistema y aislar las tuberías que no se usen.
- Eliminar o desconectar las tuberías que no se usen permanentemente.
- Usar electroválvulas para aislar la maquinaria que sea propensa a filtraciones.
- Comprobar las caídas de presión en los filtros y sustituirlos rápidamente cuando las caídas sean excesivas.
- Evitar diseñar el sistema según un estándar excesivamente elevado e innecesario.

Sistemas de refrigeración.

- Asegurarse de que la temperatura del espacio refrigerado no es menor de la que se necesita. Un incremento de 1°C en la temperatura que se desea mantener permite ahorrar entre un 2% y un 4% de energía.
- Asegurarse de que la carga esté tan fría como sea posible cuando se introduzca en el espacio refrigerado. Cuando sea posible, estudiar un preenfriamiento de la carga mediante aire a temperatura ambiente o agua.
- Minimizar los periodos en los que las puertas del almacén están abiertas.
- Reparar el sellado de las puertas y/o el aislamiento cuando se dañe.
- Reducir la entrada de calor recolocando el alumbrado, ventiladores, bombas, etc. externamente o usando modelos de mayor eficacia.
- Comprobar la operación de descarche. Ajustar los temporizadores o adecuar los controles de descarche.
- Considerar la instalación de un compresor más eficiente con control de capacidad integrado.
- Controlar el ventilador para adecuarlo a las necesidades de enfriamiento.
- Comprobar las fugas y detenerlas rápidamente. Las burbujas en el líquido indican que la carga es baja y que pueden existir fugas.

- Asegurar que el aire circula libremente alrededor de los condensadores. Tenerlos separados de los muros y evitar que les dé la luz del sol directamente.

Cintas transportadoras.

- Usar sensores, por ejemplo una fotocélula o un sensor de corriente en el motor para detectar cuándo la cinta está sin carga o apagada.
- Considerar mapear la cinta de manera que las secciones que no se usen estén desconectadas.

1-4-2 Eficiencia de la transmisión

Una vez que se ha examinado la carga para asegurarse de que se está usando eficazmente, debemos prestar atención al sistema de transmisión.

Eficiencia de los engranajes

La mayoría de los ejes de engranajes tienen una eficacia elevada. Sin embargo, una selección cuidadosa y el mantenimiento de los engranajes mejorará el rendimiento.

Las pérdidas por transmisión dependen de:

- El tipo de engranaje. Un engranaje de dientes rectos tiene un rendimiento del 85–90%, comparado con el 98.0–98.5% de uno helicoidal.
- Selección de la transmisión. Minimizando el número de engranajes se produce una máxima eficiencia, pero se incrementa el coste y el tamaño de la transmisión.
- Calidad de los engranajes. Las pérdidas por fricción dependen de la precisión y calidad de la superficie del engranaje. Por ello es importante usar engranajes suministrados por fabricantes de alta calidad.
- Tipo de comportamiento.
- Lubricación.
- Condiciones del engranaje.

Prestar atención a estos detalles incrementará la eficiencia de la transmisión.

Cintas transportadoras

- Las modernas correas lisas o con cuñas pueden ser más eficientes que las tradicionales en V (ver tabla). Por añadido, las correas en V y con cuñas se deterioran con el tiempo y pierden el 4% de su eficacia, incluso el 5–10% más si no se mantienen adecuadamente.

| Tipo de correa | Mejoras típicas |
|----------------|-----------------|
| V | – |
| Cuña/dentada | 2% |
| Lisas | 5–6% |

- Sobredimensionar o infradimensionar las correas en V puede producir pérdidas adicionales.
- Asegurar que la tensión de las correas es la adecuada.
- Si falla una correa en un sistema compuesto por varias, sustituirlas todas. Idealmente, evitar sistemas con muchas correas porque las diferencias de tensión son inevitables.
- Comprobar la alineación de las poleas. Para sistemas con correas, montar el motor en guías deslizantes que permitan que tanto el alineamiento como la tensión se puedan ajustar fácilmente.
- Es importante que los ejes del motor y de la carga estén paralelos. Las poleas pueden estar alineadas funcionando con mucha tensión entre la polea

grande y la pequeña. Si los ejes están paralelos, la correa será paralela a las superficies de ambas poleas.

- Cuando las poleas deban ser sustituidas, es particularmente beneficioso considerar cambiar el tipo de accionamiento.

Alineación de los acoplamientos.

Los fabricantes de motores publican información sobre alineamientos simples utilizando galgas extensométricas. En muchas aplicaciones se podrían utilizar los equipos de alineación por láser (de utilización sencilla, aunque relativamente caros).

1-5 Reducción de las pérdidas en el motor

Esta sección trata las formas prácticas de reducir las pérdidas mecánicas en los motores de inducción de corriente alterna e indica los ahorros a hacer a partir de tres medidas clave de eficiencia energética, es decir:

- Motores de alto rendimiento.
- La reparación cuidadosa del motor asegura que las pérdidas en el motor se minimizan.
- Usar motores del tamaño adecuado para evitar las grandes pérdidas de motores parcialmente cargados.

Como complemento, se tratan dos técnicas para reducir las pérdidas en motores con cargas ligeras:

- Reconexión permanente en estrella.
- Control de optimización de energía.

El rendimiento de un motor podría parecer elevado comparado con el de la bomba o el ventilador que controlan, pero 1kW de pérdidas por calor en un motor de 7.5 kW es un gasto enorme de energía. Se podría incluso estar pagando dos veces por esta pérdida de calor (por ejemplo en sistemas de refrigeración representa mayor a calor a eliminar).

1-5-1 Motores de alto rendimiento.

Hace 30 años, la necesidad de reducir el coste de los motores condujo a una reducción del contenido en hierro y cobre del motor. El resultado final de este cambio fue una disminución del rendimiento.

Actualmente, los fabricantes de motores están compitiendo para producir motores que mejoren el rendimiento. La mayoría ofrece motores de eficiencia energética o de alta eficiencia, otros incluso ofrecen motores de alto rendimiento sin un coste extra. Esto es posible porque las pérdidas en el motor han sido reducidas debido al uso de nuevos materiales, un mejor diseño y un mejor proceso de fabricación.

Como los motores de alto rendimiento contienen ventiladores más pequeños y más eficaces y tienen menores pérdidas magnéticas, tienden a ser más silenciosos. Esto es una ventaja cuando el ruido es un factor crítico. Los motores de alto rendimiento tienen generalmente un mejor factor de potencia, que puede dar adicionales ahorros a través de una reducción en los requerimientos máximos de kVA.

1-5-2 Reparación del motor.

Una gran cantidad de motores, especialmente los motores grandes o de diseño especial, se reparan varias veces durante su vida de funcionamiento. Es necesario prestar atención y cuidado al proceso de reparación, ya que, como resto de estos procesos se podrían producir reducciones importantes del rendimiento.

Es importante prestar atención a:

- la medida y el número de vueltas del bobinado sustituido;
- la temperatura a la que el estátor se calienta para eliminar el bobinado.
- usar los repuestos adecuados.
- manipulado mecánico general.

El rebobinado de un motor puede reducir permanentemente su rendimiento en un 1% aproximadamente, pero si se hace correctamente, la reducción puede quedarse en 0.5 % o menos.

En la práctica, rara vez resulta económico reparar motores de inducción de capacidad igual o menor de 7.5 kW .

¿Reparar o sustituir?

Cuando es imprescindible mantener un sistema o proceso en condiciones de servicio, el coste del tiempo que permanece inactivo y la forma más rápida de reintegrar el sistema serán los puntos más importantes a tener en cuenta ante la toma de decisión. Si el motor es de capacidad y velocidad comunes, podría estar disponible una unidad de recambio en stock y en estos casos, si existe posibilidad de elegir, se debería comprar un motor de alto rendimiento. Pero en otros casos, por ejemplo con máquinas especiales, repararlas podría ser más rápido y barato.

Sin embargo, si hay menos prisa para sustituir o re-bobinar un motor, por ejemplo cuando hay un motor de más o el motor se usa menos frecuentemente o en aplicaciones menos críticas, los cálculos del coste durante su vida útil deberían realizarse para determinar si reparar o sustituir por un motor de alto rendimiento resultaría más económico.

Si se opta por sustituir el motor, se tiene una oportunidad de comprar un motor de mayor rendimiento y así obtener una mejora del 3% en el motor. Sin embargo, el beneficio será más grande, porque incluso si se les presta el cuidado necesario durante la reparación, el rendimiento del motor reparado caerá aproximadamente un 0.5%. La diferencia neta en rendimiento entre un motor nuevo de alto rendimiento y un motor reparado podría ser entonces del 3.5%. Aunque el coste de reparar un motor es normalmente menor que el de comprar uno nuevo, los ahorros de energía de comprar uno nuevo puede hacer que esta opción sea más atractiva.

Los motores modernos de alto rendimiento sufren menos pérdidas de rendimiento después de ser re-bobinados, porque las láminas de acero dentro de la mayoría de ellos pueden soportar mejor las elevadas temperaturas necesarias para eliminar los bobinados viejos.

1-5-3 Dimensionado del motor.

Los motores modernos están normalmente diseñados para un rendimiento máximo a plena carga del 75% y entre el 50% y el 100% hay sólo una variación mínima en el rendimiento. Sin embargo, se produce una reducción significativa con cargas que representan el 25% del total de la carga o menos, y eso es en este nivel una consideración a tener en cuenta para escoger un motor más pequeño.

Es importante recordar que es la carga la que determina cuánta potencia entrega el motor. El tamaño del motor no indica necesariamente la potencia que va a entregar. Por ejemplo, un ventilador que requiere 15kW podría manejarse con un motor de 15kW (en caso de que pudiesen acoplarse). También podría moverse con un motor de 55 kW, y aunque podría funcionar, no sería muy eficaz. Sin embargo, conectándolo a un motor de 10 kW provocaría que el motor no funcionase. Este ejemplo muestra la importancia de conocer la potencia entregada por un motor.

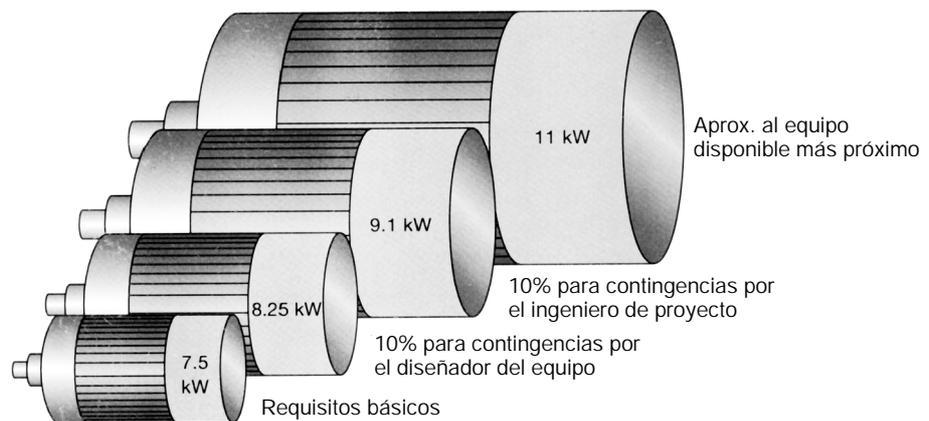
Posibilidades de los motores de menor tamaño.

En general, los equipos empaquetados, como compresores que funcionan a las condiciones máximas incluyen un motor que está bien dimensionado para el equipo y la operación a realizar.

Sin embargo, es posible optar por la reducción del tamaño del motor en el siguiente tipo de aplicaciones:

- Ventiladores y equipos de bombeo que, por ejemplo, se hayan comprado de segunda mano. Estos normalmente trabajan con una potencia de salida menor que los que han sido diseñados específicamente.
- Sistemas especialmente diseñados a medida para solucionar ciertas aplicaciones especiales. La capacidad del motor está, normalmente, sobredimensionada.
- Cambios de producción que hayan provocado una reducción de la carga en el motor.

La siguiente figura muestra algunas de las razones por las que los motores se pueden sobredimensionar.



Hay circunstancias claras en las que es planteable sustituir un motor por otro más pequeño:

- Si se toma la decisión de sustituir un motor estropeado, comprar un motor más pequeño reducirá los costes y además significará un ahorro en el precio de compra.
- Si el motor está en servicio todavía, podría merecer la pena sustituirlo si está muy sobredimensionado.

1-5-4 Consideraciones prácticas cuando cambiamos un motor.

Cuando sustituimos un motor por uno más pequeño o de mayor rendimiento, es importante tener en cuenta:

- *Longitud del motor y fijaciones:* En algunos casos el motor sustituido puede ser distinto en sus fijaciones, longitud y posiblemente, en el diámetro y longitud del eje. Los cambios necesarios para el montaje y las modificaciones deben tenerse en cuenta para determinar el aspecto financiero del cambio.
- *Temperatura de funcionamiento:* Los motores de alto rendimiento funcionan dentro del rango de temperatura Clase B, al igual que los motores estándar, pero no disipan tanto calor.

- *Capacidad máxima de potencia:* Antes de cambiar a un motor más pequeño, de menor capacidad, es importante comprobar que ninguna carga provocará que se supere esta nueva capacidad.
- *Protección del motor:* El cambio a un nuevo motor debe ser acompañado por modificaciones en las protecciones y en la capacidad de los fusibles. Muchos motores vienen preparados con termistores para proteger contra sobrecargas térmicas; estas deberían ser conectadas y utilizadas.
- *Deslizamiento del motor:* La característica de deslizamiento de un motor afecta a la velocidad de funcionamiento y puede por lo tanto tener una repercusión en el consumo de energía. El reducido deslizamiento de algunos motores modernos de alto rendimiento puede influir en dificultades en el control de algunas aplicaciones muy específicas (tales como trituradoras o pulidoras) donde pueden producirse incrementos muy rápidos de la carga.
- *Par de arranque:* Cuando se toma la decisión de escoger un motor más pequeño se debe comprobar la puesta en servicio de la aplicación debido a que es probable que el par de arranque desarrollado por el nuevo motor de menor capacidad sea menor que el par de arranque desarrollado por el motor ya existente. En los casos donde haya un arrancador estrella/triángulo, debe tenerse en cuenta un arranque directo a la línea.
- *Cargas especiales:* Muchos sistemas tienen como función principal la de proporcionar un par de arranque y aceleración a la carga, por ejemplo las centrifugadoras o volantes de inercia en las prensas. La corriente de funcionamiento de esas máquinas, es decir, cuando se alcanza la velocidad adecuada, es bastante baja y podría dar la impresión de que podría ser posible disminuir el tamaño del motor o realizar la reconexión en estrella.

1-5-5 Reducción de pérdidas en motores con cargas ligeras.

Los motores que funcionan con bajas cargas no son eficaces debido a que las pérdidas fijas son desproporcionadamente altas. Por este motivo, el dimensionado correcto del motor es una cuestión de gran importancia.

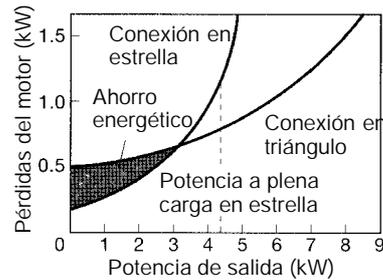
A baja carga, la potencia necesitada para magnetizar el acero provocaba unas pérdidas mayores en el rendimiento. Puesto que las pérdidas son proporcionales al cuadrado de la tensión, disminuyendo la tensión (sobre un rango limitado) se compensará el incremento de corriente que ocurre normalmente cuando hay una baja tensión de alimentación. Se puede por lo tanto conseguir un ahorro de energía.

Utilizando un motor más pequeño, siempre que esto sea posible, se reduce la cantidad de hierro a magnetizar, y por tanto las pérdidas en el hierro. Una ventaja adicional es que las pérdidas en el hierro son en gran parte reactivas, y por tanto, reduciendo el voltaje puede haber efectos particularmente beneficiosos en el factor de potencia.

Otras dos formas diferentes de conseguir un efecto similar son la conexión permanente en estrella y la optimización de energía. Sin embargo, el ahorro de energía con estas dos técnicas nunca será mayor que las pérdidas en el hierro.

Conexión permanente en estrella.

Conectando un motor en estrella se reduce la tensión entre los bobinados del motor en un 58% respecto a la tensión cuando funciona en triángulo, y el motor proporciona la tercera parte del par. Con cargas por debajo del 40–45% de la potencia, conectando el motor en estrella de forma permanente, se pueden obtener ahorros de energía.



Para prevenir el sobrecalentamiento del motor, comprobar siempre que la corriente de línea en estrella no supera la corriente en triángulo. Si el motor se arrancase directo a la línea, comprobar también que haya un par de arranque adecuado.

Este método no es aplicable en motores más pequeños con seis terminales diseñados para operación a dos tensiones, es decir 220–240 voltios monofásicos/380–420 voltios trifásicos, ya que el motor está conectado normalmente en estrella para operación a alto voltaje.

1-5-6 Mantenimiento del motor.

Aunque el mantenimiento que necesita un motor en jaula de ardilla es mínimo, se debe prestar una atención periódica a lo siguiente para, de esta forma, mantener un alto rendimiento de operación.

- Muchos motores pequeños (alrededor de 22kW) se escogen con rodamientos sellados y blindados como estándar. Cuando los rodamientos deban ser engrasados, debe hacerse de acuerdo con las instrucciones del fabricante y sustituidos siempre con los componentes adecuados.
- Un buen alineamiento del eje del motor con la carga reduce las pérdidas en funcionamiento, el desgaste de los rodamientos, ruido y vibración .
- La limpieza del conjunto es importante para asegurar que el calor generado dentro del motor se elimina con efectividad. Los ventiladores de admisión y las superficies del armazón deberían mantenerse sin suciedad. También asegurarse de que el aire que circula sobre el motor no encuentra impedimentos, especialmente la parte cercana al ventilador. Un incremento en la temperatura del bobinado del estator de 1°C puede producir un incremento de al menos el 0.5% sobre las pérdidas I^2R , además de acortar la vida del aislamiento del motor.

1-6 Reducir la velocidad de la carga

No todos los procesos ahorran energía. Hay procesos en los que la demanda de energía no varía con la velocidad. Para estimar las posibilidades de ahorro energético, y definir claramente los puntos de ahorro energético es necesario en primer lugar conocer el tipo de carga con la que está trabajando una aplicación concreta.

1-6-1 Tipos de carga.

El ahorro potencial de energía al disminuir la velocidad en la carga depende de las características de la carga. Básicamente las cargas se clasifican en tres tipos: par variable, par constante y potencia constante.

Par variable.

Las leyes fundamentales que gobiernan el funcionamiento de los ventiladores y las bombas nos muestran que estas aplicaciones tienen un gran potencial

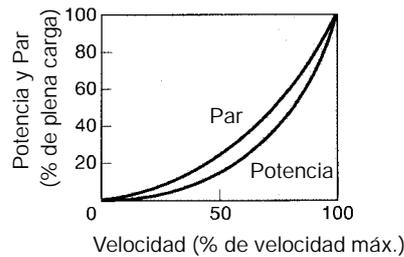
de ahorro de energía. Las leyes asociadas afirman que el par varía con el cuadrado de la velocidad y la potencia con el cubo de la velocidad, por ejemplo:

Caudal \propto velocidad.

Presión o par \propto velocidad al cuadrado.

Potencia \propto velocidad al cubo.

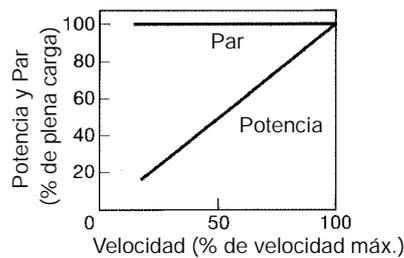
La relación entre la potencia y la velocidad se conoce como la ley de ' la potencia al cubo ' o como la ley del ' cuadrado del par '. Reduciendo la velocidad de la carga, se aprecia que para cambios relativamente pequeños de velocidad se produce una gran disminución en la potencia absorbida.



Par constante.

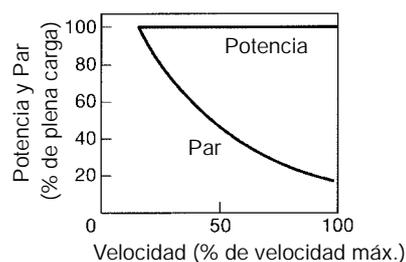
Para aplicaciones en las cuales se producen desplazamientos positivos (compresores de aire, cintas transportadoras, agitadores, aplastadores y bobinadoras), el par no varía con la velocidad y la potencia es directamente proporcional al trabajo útil realizado.

Aunque los potenciales ahorros de energía que se consiguen reduciendo la velocidad no son tan importantes como para las aplicaciones que se rigen por la ley del par al cuadrado, merece la pena prestar atención a este tipo de aplicaciones, ya que, reduciendo a la mitad la velocidad de una carga de par constante se puede reducir igualmente a la mitad el consumo de energía.



Potencia constante.

El tercer tipo de característica de la carga se da donde la potencia no varía con la velocidad y el par es inversamente proporcional a la velocidad. Las aplicaciones de este tipo son p.e. máquinas-herramienta y bobinadoras.



Del estudio de los tres tipos de carga mencionados con sus correspondientes gráficas de funcionamiento se observa que los ahorros más importantes se obtienen en las cargas de par cuadrático, donde una pequeña disminución de la velocidad supone una gran disminución en la potencia absorbida por el motor (reduciendo la velocidad al 20% puede reducirse el consumo de energía al 50%).

1-6-2 Formas de cambiar la velocidad de los mecanismos.

El motor de inducción es un mecanismo de velocidad fija cuando opera a una frecuencia constante y una tensión de alimentación constante. De cualquier manera, existen bastantes técnicas que proporcionan velocidades variables o diferentes a un motor de inducción(ver tabla).

De todos los métodos mencionados, el uso de Convertidores de Frecuencia está considerado como el de mayores posibilidades reales de amortización y de ahorro energético.

La siguiente tabla muestra las formas de cambiar la velocidad en un sistema motor-carga.

| Métodos | Comentarios |
|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Motor de velocidad variable. | Utilizado donde se requiere una velocidad discreta o un número finito de velocidades. |
| Motores de múltiple velocidad. | Para operaciones en las que se demanda de dos a cuatro distintos servicios. |
| Motor estándar a diferente velocidad | La velocidad disponible es tratada en un apéndice. |
| Cambiando el radio de la polea en una cinta transportadora. | Opción de bajo coste. Utilizado cuando una única operación demanda una velocidad fija. |

1-6-3 Variadores de velocidad.

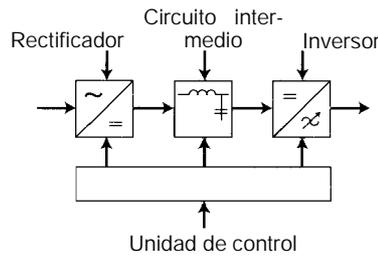
El principio básico de funcionamiento de los Convertidores de Frecuencia es transformar la energía eléctrica de frecuencia industrial en energía eléctrica de frecuencia variable.

Los Convertidores de Frecuencia para motores de inducción AC consiguen esta variación de frecuencia con dos etapas de funcionamiento: Una primera etapa rectificadora que transforma corriente alterna en continua, y otra inversora que transforma corriente continua en alterna, con una frecuencia y un valor de tensión que dependerá de las señales de consigna. De esta forma se consigue una tensión variable en los terminales del motor y de este modo se habilita el motor de inducción para ser arrancado de forma eficiente a diferentes velocidades.

El uso de Convertidores de Frecuencia OMRON añade un enorme potencial para el ahorro de energía disminuyendo la velocidad del motor en muchas aplicaciones. Además, aportan los siguientes beneficios:

- * Mejora del proceso de control y por lo tanto la calidad del producto
- * Arranque programable por soft, parada y freno.
- * Amplio rango de velocidad, par y potencia.
- * Facilita el control con varios motores.
- * Factor de potencia unitario.
- * Respuesta dinámica comparable con los driver de DC.
- * Capacidad de by-pass ante fallos del variador.

Los **Convertidores de Frecuencia OMRON** , por su bajo precio y mayor versatilidad, están siendo la elección preferente para el control de velocidad.



Etapas de funcionamiento de un Convertidor de Frecuencia.

El uso de Convertidores de Frecuencia OMRON permite la realización de dos tipos de control:

Control manual de velocidad. La velocidad puede ser establecida o modificada manualmente (display de operador). Posibilidad de variación en el sentido de giro.

Control automático de velocidad. Utilizando realimentación se puede ajustar la velocidad automáticamente. Esta solución es la ideal para su instalación en aplicaciones en las que la velocidad demandada varía de forma continua.

1-6-4 Tecnología de los variadores de velocidad.

Los Convertidores de Frecuencia OMRON trabajan con tecnología PWM (modulación del ancho de pulsos), en la cual la forma de curva de la tensión entregada al motor es sincronizada a alta frecuencia por conmutaciones en los componentes de salida del inversor. El rendimiento de este método de control es superior al 95% .

Esta forma de onda sintetizada tiene una pequeña cantidad de distorsión de armónicos, los cuales incrementan las pérdidas en el motor. Con motores viejos, es importante comprobar que el aislamiento puede resistir los picos de tensión debidos al Convertidor de Frecuencia.

La utilización de Convertidores de Frecuencia OMRON con control vectorial presenta rendimiento próximo a los motores DC. Esta característica hace que los Convertidores OMRON sean instalables en aplicaciones donde estaban instalados los motores de DC , que, hasta ahora , eran los más utilizados.

1-6-5 Mejoras en la tecnología de los variadores de velocidad.

En la pasada década se llevó a cabo considerables procesos en la realización de Convertidores de Frecuencia para motores de inducción lo que significa que estas unidades son la elección preferida para las aplicaciones de variación de velocidad. Las mejoras han sido posibles gracias al uso de semiconductores más potentes que pueden conmutar más rápido y abaratan los procesos para control.

Los principales efectos de estas mejoras son:

- * Reducir costes.
- * Mejorar el rendimiento, especialmente en control dinámico.
- * Mejor forma de onda, reduciendo el ruido del motor y menor pérdidas.
- * Gran flexibilidad en el control.
- * Mejora en la etapa de entrada del convertidor, reduciéndose los armónicos de la línea, factor de potencia unitario, regeneración y filtrado.
- * Mayor flexibilidad.

1-6-6 Características de optimización de energía en variadores.

El **Convertidor de Frecuencia OMRON 3G3HV** tiene incorporadas características en sus diseños para la optimización de energía las cuales son extre-

madamente útiles con variaciones de velocidad suaves en las cargas. Esta característica reduce la tensión de salida en baja carga y de este modo reduce las pérdidas en el hierro.

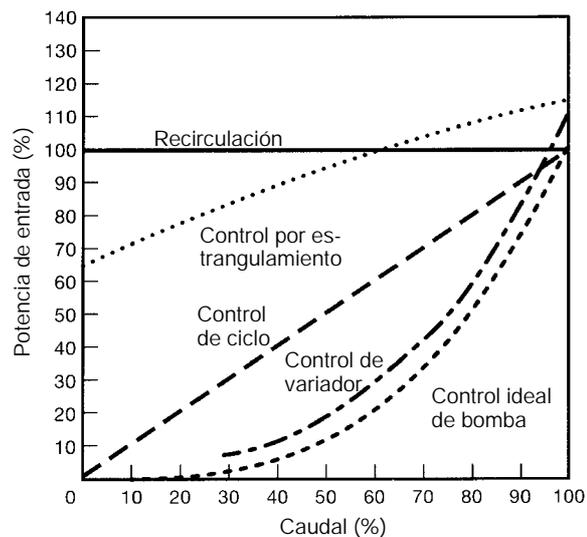
1-6-7 Consideraciones prácticas usando Convertidores de Frecuencia.

Cuando se utilizan variadores, es importante considerar:

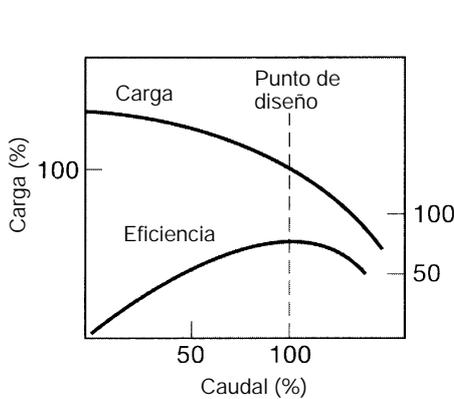
- *Calentamiento del motor.* Para cargas de par constante es necesario utilizar un ventilador exterior.
- *Incremento de velocidad y potencia.* Los inversores tienen la oportunidad de funcionar a velocidades por encima de la velocidad nominal. En una aplicación de la ley del par cuadrático, un incremento del 10% en la velocidad aumenta la potencia entregada en un 33% y el par en un 21%.
- *Compatibilidad electromagnética.* OMRON puede suministrar filtros especiales para sus convertidores de frecuencia. Estos filtros limitan la cantidad de emisiones en los conductores impuestas por las fuentes de alimentación principal.

1-6-8 Control de velocidad en bombas centrífugas.

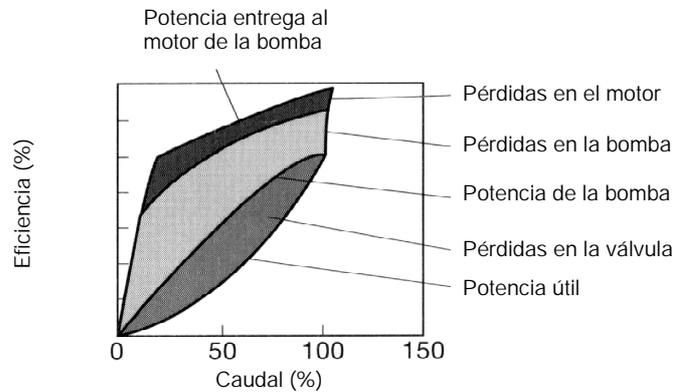
Hay varios modos de reducir el flujo en sistemas de bombeo, pero como se puede ver en la siguiente figura, ninguno es tan efectivo realmente como la reducción de la velocidad de la bomba.



El método más común de regulación de flujo es el de estrangular, pero la eficacia es pobre porque la bomba no está funcionando en su punto de diseño. Las pérdidas de potencia para sistemas de regulación por estrangulamiento se pueden ver en las siguientes gráficas.

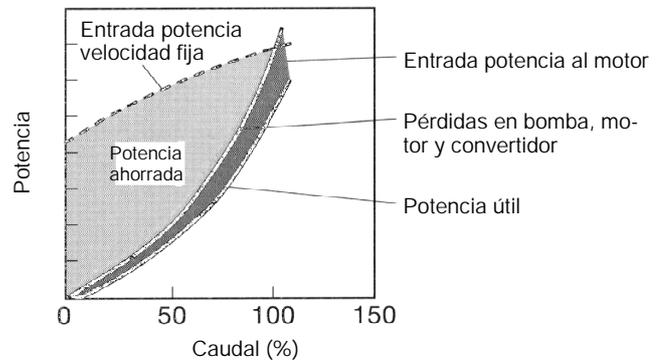
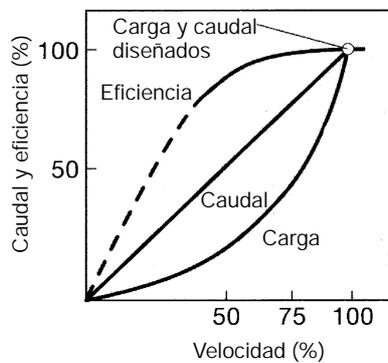


Curva típica de bomba centrífuga



Consumo de potencia en bomba de velocidad fija

Las características de una bomba típica para una bomba de velocidad controlada y el ahorro de potencia comparado con un control por estrangulación se muestran en las gráficas siguientes.



El uso de **Convertidores de Frecuencia OMRON** también puede reducir la cavitación de la bomba y eliminar el golpe de ariete (debido a sus características de arranque suave).

Entre las múltiples aplicaciones donde se pueden utilizar los convertidores de frecuencia se incluyen:

- En bombeo de agua donde largos sistemas de tuberías están sometidos a las pérdidas de fricción y donde el caudal varía considerablemente.
- Bombas conmutando entre sistemas con diferentes características.
- Procesos de carga con ciclos que requieren variación de la tasa de caudal.
- Sistemas de caudal constante con una presión de sistema que varía, por ejemplo, debido a la utilización de líquidos con viscosidad variable.

1-6-9 Cálculo de Ahorro Energético en un Sistema de Bombeo.

Se estudiará a continuación el ahorro energético que supone la utilización de un convertidor de frecuencia OMRON para alimentar el motor de arrastre de la bomba, frente al uso de la regulación por estrangulamiento.

En definitiva, se compara la regulación por estrangulamiento con la regulación a velocidad variable proporcionada por los convertidores de frecuencia OMRON.

Si se tienen las características hidráulicas del sistema y de la bomba, así como las horas de funcionamiento con caudales parciales, el cálculo de la mejora obtenible con la adopción de un convertidor de frecuencia OMRON se puede considerar como sencillo.

El **caudal nominal** (m³/s) se ha considerado de 0,1. La **presión nominal** (mca) se ha considerado de 90.

La **curva presión caudal** de la bomba está dada por la expresión: $H = 120 - 30 \cdot (Q/0.1)^2$

El programa anual está dado por la siguiente tabla:

| Caudal | Horas/año |
|--------|-----------|
| 100% | 1.000 |
| 90% | 2.000 |
| 80% | 2.000 |
| 70% | 1.000 |

El Rendimiento de la bomba al 80%:

A velocidad fija varía con la 10ª raíz del caudal.

A velocidad variable varía con la misma ley, pero el caudal nominal es proporcional a la velocidad.

El Rendimiento del Motor varía con la raíz 16ª de la potencia de su eje.

El Rendimiento del Convertidor de Frecuencia es el 96,5%. Este rendimiento se mantiene fijo para todas las cargas.

El precio del kWh se ha considerado de 16 pesetas.

Teniendo en cuenta los parámetros antes comentados, se muestran a continuación los resultados en los dos tipos de regulación:

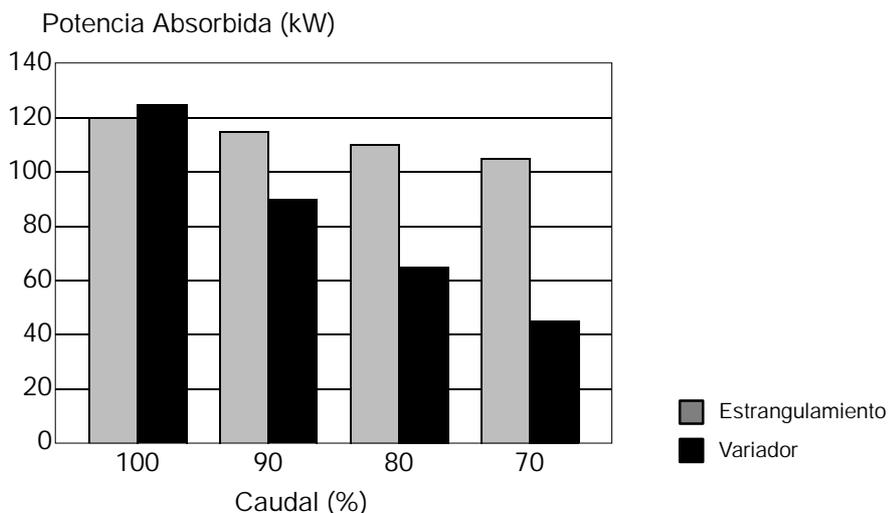
Regulación por estrangulamiento.

| | | Caudal | | | |
|---------------------------------|-----|---------|---------|---------|---------|
| | | 0,10 | 0,09 | 0,08 | 0,07 |
| Presión (mca) | | 90 | 95,7 | 100,8 | 105,3 |
| Rendimiento Bomba | | 80,00% | 79,16% | 78,23% | 77,20% |
| Potencia en Eje Bomba (kW) | | 110,36 | 106,74 | 101,12 | 93,67 |
| Potencia del motor elegido (kW) | 132 | | | | |
| Rendimiento del motor | 93% | | | | |
| Rendimiento del motor | | 91,97% | 91,77% | 91,46% | 91,03% |
| Potencia absorbida | | 120 | 116,30 | 110,55 | 102,90 |
| Horas de funcionamiento | | 1000 | 2000 | 2000 | 1000 |
| Energía Consumida (kWh) | | 120.005 | 237.607 | 221.107 | 102.902 |
| Energía total consumida | | | | | 676.621 |

Regulación por variación de velocidad.

| | Caudal | | | |
|-------------------------------------------------|---------|---------|---------|----------------|
| Presión (mca) | 90 | 72,9 | 57,6 | 44,1 |
| Velocidad | 100% | 90% | 80% | 80% |
| Rendimiento Bomba | 80% | 80% | 80% | 80% |
| Potencia en Eje Bomba (kW) | 110,36 | 80,45 | 56,41 | 37,85 |
| Rendimiento del motor | 91,97% | 90,17% | 88,20% | 86,02% |
| Rendimiento del convertidor | 96,50% | 96,50% | 96,50% | 96,50% |
| Potencia absorbida (kW) | 124,36 | 92,47 | 66,39 | 45,60 |
| Energía Consumida (kWh) | 124,357 | 184,930 | 132,783 | 45,605 |
| Energía total consumida | | | | 487.675 |
| Ahorro respecto a caso inicial | | | | 188.946 |
| | | | | 27,92% |
| Ahorro económico anual (millones de pesetas) | | | | 3,023 |
| Capitalización del ahorro (millones de pesetas) | | | | 12,735 |
| Interés: 6,00% Años: 5 | | | | |

Para simplificar la comparativa entre los dos métodos de control, se muestra a continuación los datos de las tablas anteriores mediante un gráfico:



En el dimensionado de sistemas de bombeo se toman ciertos márgenes de seguridad que conducen a un sobredimensionamiento, por lo que la bomba no funciona con su caudal óptimo desde el punto de vista energético.

Tal y como muestra el gráfico, a medida que baja el caudal, las diferencias entre los consumos de potencia se hacen más importantes.

En muchas ocasiones, a la hora de realizar el cálculo de ahorro energético no se disponen de todos los datos reflejados en las tablas comparativas anteriores. Se presenta a continuación un método simplificado que puede servir para una primera aproximación:

Datos de Entrada.

Caudal Medio: $Q_m = 400$
 Altura con estrangulamiento: $H_1 (m) = 70$

Densidad de Fluido $\rho = 1000$
 Rendimiento preliminar $\eta_1 = 78\%$
 Altura necesaria con regulación de Velocidad $H_2 = 24$
 Rendimiento final $\eta_2 = 84\%$
 Rendimiento del inversor $\eta = 91\%$
 Horas anuales de servicio $H = 3500$
 Coste en kWh $K=16$ ptas.

Cálculos:

Potencia Absorbida estrangulamiento.

$$P_1 \text{ (kw)} = Q_m * H_1 * \rho * 9,81 / (3600 * \eta_1) = 97,820$$

Potencia Absorbida Velocidad Variable.

$$P_2 \text{ (kw)} = Q_m * H_2 * \rho * 9,81 / (3600 * \eta_2) = 31,143$$

Potencia Ahorrada

$$P_a = P_1 - P_2 = 66,677$$

Ahorro anual de energía

$$P_aH = 212.368 \text{ (kWh)}$$

Ahorro económico anual

$$P_aHK = 3,398 \text{ millones de pesetas}$$

1-6-10 Control de velocidad en ventiladores.

También en este caso la utilización de los Convertidores de Frecuencia OMRON para adaptar el ventilador a las características del sistema (regulación) es el método más eficiente.

Entre los beneficios que aportan los **Convertidores de Frecuencia OMRON** en las aplicaciones con ventiladores se incluyen los siguientes:

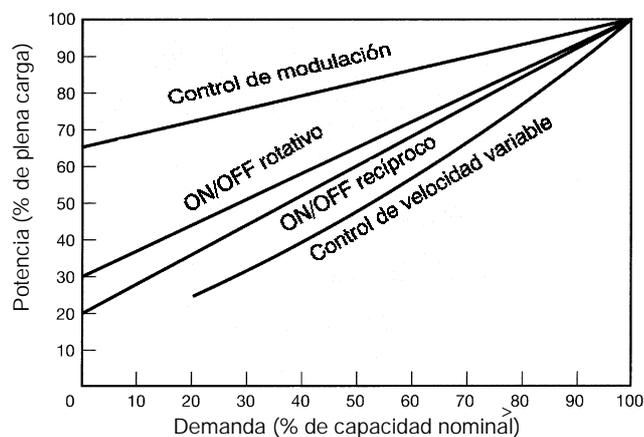
Mejoran la combustión en las calderas, especialmente cuando se utilizan con oxígeno en buen estado.

Reducen el ruido en sistemas de conducción de aire en calentamiento y ventilación debido a la eliminación de los reguladores.

1-6-11 Control de velocidad en compresores.

La hélice y el pistón de los compresores son cargas de par constante, con lo que los ahorros procedentes de la utilización de control de velocidad variable dependen del sistema de control que se ha sustituido.

La figura muestra el ahorro de energía conseguido con la adaptación de un Convertidor de Frecuencia OMRON a la hélice del compresor comparado con otros métodos de control de flujo.



El ahorro de energía con una carga de par constante será considerablemente menor que con bombas o ventiladores que cumplen la ley del par cuadrático. En el caso en el que, en función del tipo de carga, el ahorro de energía conseguido al instalar un **convertidor de frecuencia OMRON** sea mínimo, se puede afirmar que su uso supone un ahorro de costes mediante una mejora en el proceso de calidad.

1-7 Toma de decisiones

En este último apartado se dan unas nociones básicas sobre los parámetros a tener en cuenta a la hora de realizar los cálculos aproximados del ahorro energético que supone el uso de un **Convertidor de Frecuencia OMRON**.

Cálculo de los costes de funcionamiento.

Un método sencillo de estimación del cálculo de los costes de un motor o cualquier otra carga es multiplicar los siguientes parámetros:

- * Potencia nominal en el motor.
- * Número anual de horas en funcionamiento.
- * El coste medio de electricidad en pesetas/kWh.

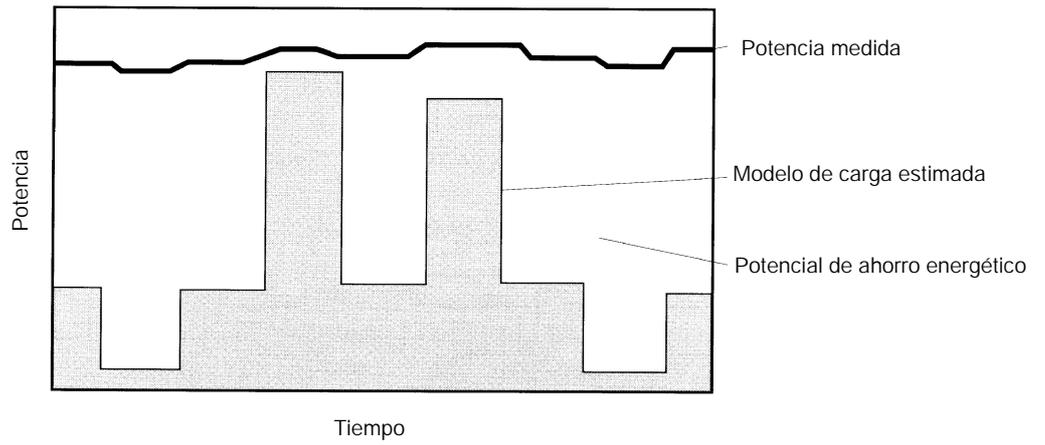
Por ejemplo, el coste aproximado de un motor de 11 kW funcionando durante 5000 horas/año para un coste de 12 p/kWh es ($11 \text{ kW} \times 5,000 \text{ horas} \times 12 \text{ p/kWh}$) = 660.000 pesetas al año.

Este cálculo ignora el rendimiento del motor y las condiciones de carga actual, pero proporciona una estimación de los costes sin hacer mediciones.

Utilizando esta aproximación, se puede calcular la media de coste de funcionamiento de cada kW de capacidad del motor. Este cálculo proporciona una cifra que puede ser utilizada para estimar los costes de funcionamiento. Por ejemplo, en un caso donde el coste de la electricidad es 1200 p/kWh y asumiendo un rendimiento medio del 90%, el coste será de 110.000 pesetas para un motor de 1 kW de carga durante un año.

Elección de los datos a tener en cuenta.

- *Sin mediciones.* El conocimiento del régimen de operación puede ser suficiente para recopilar una lista de inventario y observar los bajos costes del aprovechamiento del ahorro de energía.
- *Horas de funcionamiento.* Con frecuencia conocemos exactamente el comportamiento del equipo en funcionamiento, lo que nos da una idea exacta de las horas de operación.
- *Comprobación puntual de corriente.* Una comprobación puntual del consumo de corriente en el motor, si se conoce que se mantiene fija, puede proporcionar información útil. Si la corriente leída es próxima a la que muestra la placa, el motor estará próximo a la plena carga; si es solamente una porción de la corriente que figura en la placa, está en baja carga. Este conocimiento puede ser adecuado para algunos propósitos.
- *Mediciones de potencia.* El ahorro potencial que se consigue con el acoplamiento de un Convertidor de Frecuencia OMRON puede ser estimado por los datos del consumo de potencia junto con una medida apropiada proporcional a la demanda del sistema, por ejemplo, flujo de aire o agua. El ahorro potencial de energía como consecuencia de la reducción de flujo está en función de la diferencia entre el flujo actual y el flujo requerido estimado. En ventiladores centrífugos y aplicaciones con bombas, la ley del par cuadrático nos indica que el ahorro de energía potencial se incrementa tan rápidamente como la diferencia en incrementos de flujos.



Perfil de carga de una posible aplicación con variador.

Apéndice A

Velocidad del motor

Velocidad del motor y número de polos.

La velocidad de un motor de inducción se obtiene según la fórmula.

$$\text{Velocidad de rotación (r.p.m.)} = \frac{120 \times \text{frecuencia de alimentación}}{\text{número de polos}}$$

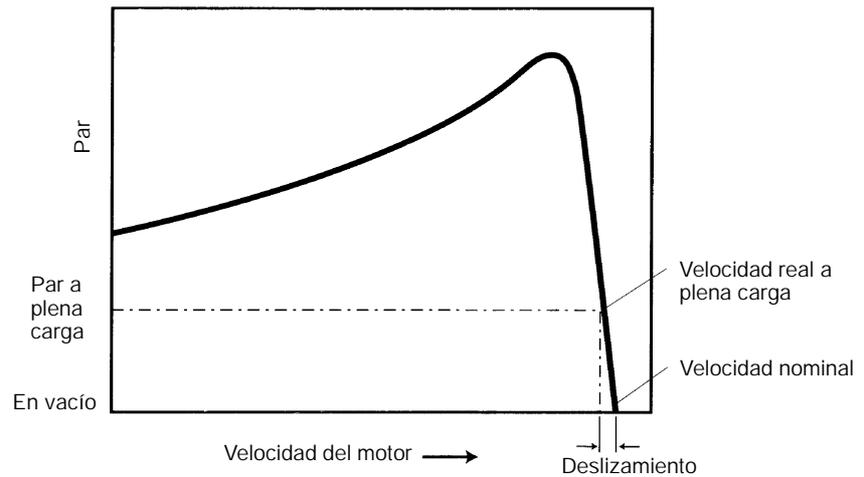
Las velocidades nominales disponibles cuando trabajamos a 50 Hz se listan en la siguiente tabla.

| Nº de polos | rmp |
|-------------|-------|
| 2 | 3.000 |
| 4 | 1.500 |
| 6 | 1.000 |
| 8 | 750 |
| 10 | 600 |
| 12 | 500 |

El uso de motores con un elevado número de polos podría parecer una idea atractiva para el funcionamiento a baja velocidad. Sin embargo, tales motores son poco comunes y para los motores de inducción con un elevado número de polos el factor de potencia y el rendimiento llegan a ser muy bajos. Los motores de dos, cuatro, seis y ocho polos son los disponibles como estándar; los motores de diez o doce polos están disponibles, pero no fácilmente. Esto es principalmente porque los motores de baja velocidad tienen que ser más grandes físicamente para la misma capacidad de potencia, y por lo tanto cuestan más.

Efecto de la carga en la velocidad del motor.

La velocidad de sincronismo descrita arriba es, en efecto, la velocidad sin carga. Sin embargo, según se incremente la carga en el motor, la velocidad disminuye un poco, según una cantidad conocida como deslizamiento². El deslizamiento viene determinado por la característica par/velocidad del motor, aunque la mayoría se construyen bajo estándares similares. Sin carga, el deslizamiento es muy pequeño; a plena carga, se incrementa normalmente alrededor del 4% - la velocidad en el eje cae, por lo tanto, ligeramente respecto al valor de sincronismo.



Eligiendo un motor de alto rendimiento como recambio podría – si el deslizamiento es considerablemente menor que en el motor original y maneja cargas que cumplen la ley del cubo – implicar un incremento en el consumo de energía. Sin embargo, este problema ocurre raras veces y con tal de que el motor-carga manejada y su sistema estén correctamente controlados, la potencia consumida por el motor disminuirá, como se esperaba.

$$^2\text{Deslizamiento} = 1 - \frac{\text{Velocidad del rotor}}{\text{Velocidad del campo rotativo}}$$

donde la velocidad del campo rotativo está determinada por la frecuencia de alimentación.

Apéndice B

Arranque del motor

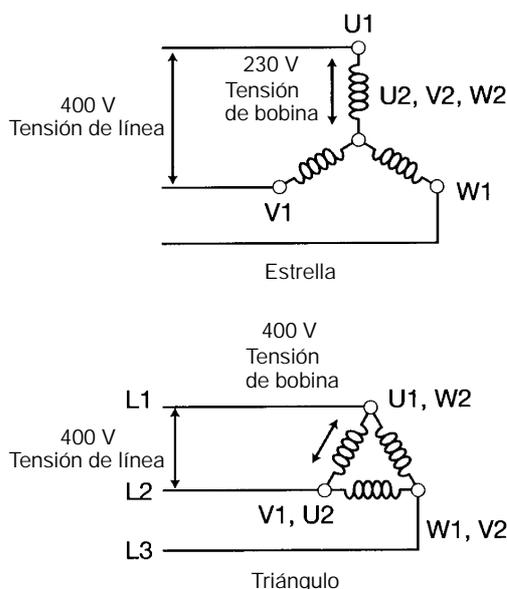
La corriente de arranque en conexión directa para un motor de inducción puede ser seis o siete veces la corriente normal a plena carga. En algunas circunstancias – y especialmente para los motores más pequeños – esta elevada corriente de arranque es aceptable, pero para máquinas más grandes, el requerimiento en el sistema eléctrico local podría ser demasiado grande y la tensión en los bobinados de la máquina podría ser excesiva.

Otros métodos de arranque siempre reducen el par de arranque además de la corriente de arranque; esto puede ser útil para la protección del equipo manejado, por ejemplo una correa, o productos en una cinta transportadora. Sin embargo, un par demasiado bajo podría significar que el motor no podría arrancar la carga.

Arranque estrella/triángulo.

En la mayoría de los motores trifásicos de inducción, los extremos de los bobinados de cada fase son llevados a los terminales y por lo tanto la máquina puede conectarse en estrella o en triángulo (ver figura). En conexión en estrella, la tensión a través del bobinado de cada fase se reduce en un 58% con respecto a la conexión en triángulo; el motor, por lo tanto, presenta una impedancia más alta a la alimentación y la corriente de arranque está limitada a un tercio de la corriente de arranque para conexión en triángulo. La totalidad del par – y por tanto el consumo de potencia – sólo se desarrolla cuando se realiza el cambio a triángulo. Esta transición de estrella a triángulo se suele realizar con un contactor temporizado.

Para reducir los costes energéticos, los motores con cargas bajas pueden conectarse permanentemente en estrella – y prácticamente sin coste.



Arrancadores electrónicos suaves.

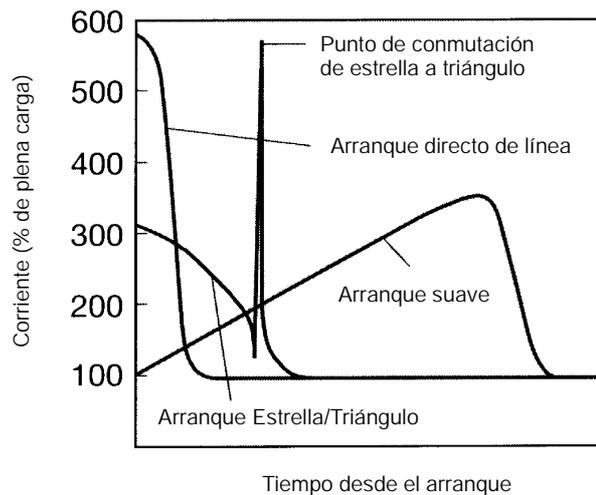
Una alternativa son los arrancadores electrónicos suaves, que usan un dispositivo simple, tal como un triac para retardar el encendido de cada ciclo de tensión y por lo tanto reducir el voltaje efectivo aplicado al motor.

Aparte de un pequeño ahorro de energía durante la rampa de subida, los arrancadores suaves no reducen la energía que consume el motor. Sin embargo, reducen el desgaste mecánico durante el arranque y la parada, permitiendo el ahorro de energía desconectando los motores con mayor frecuencia.

Muchos arrancadores suaves incorporan actualmente una característica de optimización de energía para proporcionar ahorros energéticos adicionales cuando se funciona durante largos períodos a muy baja carga. En unidades más grandes, sin embargo, es usual conmutar el arrancador suave una vez que el motor está funcionando en carga para prevenir las pérdidas de potencia de los tiristores o triacs en el equipo.

Perfiles de corriente durante el arranque.

La siguiente figura compara la corriente durante el arranque con un típico estrella/triángulo, conexión directa y arrancadores suaves. Dependiendo del momento exacto de cierre de los contactores de arranque cuando conmutamos a triángulo, es posible ver corrientes transitorias tan elevadas como 1.200% (12 x corriente a plena carga) con el correspondiente par transitorio elevado.



OMRON