

Manual Técnico Motores Eléctricos

**MOTORES ELÉCTRICOS, REFRIGERACIÓN COMERCIAL, ILUMINACIÓN,
ACONDICIONADORES DE AIRE, POLÍTICA REGIONAL, FINANCIAMIENTO**



PEER

**Programa de Eficiencia Energética Regional en los
Sector Industrial y Comercial en Centroamérica**



ISBN

Este documento fue elaborado por BUN-CA en el marco de su Estrategia Regional de Eficiencia Energética y puede ser utilizado libremente para propósitos no-comerciales con el debido reconocimiento al autor.

Esta publicación ha sido posible gracias a la ejecución del Programa PEER (Programa de Eficiencia Energética en los Sectores Industrial y Comercial en América Central), implementado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y financiado por el Fondo del Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en inglés) en el marco del Programa Operacional No. 5 del Área Temática de Cambio Climático, bajo los términos del contrato No. 50949. Las opiniones expresadas en este documento son de BUN-CA y no necesariamente reflejan el parecer de las agencias cooperantes.

Nota: Se agradece a los diferentes consultores los aportes técnicos a esta publicación.

Tabla de Contenido

TABLA DE SIMBOLOGÍA.....	2
I. Introducción.....	1
I.1 <i>Ventajas de la utilización de motores eléctricos.</i>	3
II. Tipos de Motores	4
II.1 <i>Motores de corriente directa.</i>	5
II.2 <i>Motores de corriente alterna: síncronos y asíncronos.</i>	6
II.3 <i>Motor síncrono.</i>	8
III. Pérdidas de Energía y Eficiencias.....	9
IV. Eficiencia.....	10
IV.1 Selección del motor.....	11
IV.2 Tipos de carcasa.....	11
IV.3 <i>Aislamiento del motor.</i>	12
IV.4 <i>Resistencia del aislamiento.</i>	13
IV.5 <i>El par en motores de inducción.</i>	14
V. Efectos Debido a la Calidad de Suministro.....	15
VI. Factor de Carga.....	17
VII. Factor de Potencia.....	18
VIII. Perfil de Carga.....	18
IX. Factor de Servicio.....	19
X. Selección del Tamaño Adecuado del Motor.....	20
XI. Reemplazo de Motores Sobredimensionados.....	20
XII. Sustitución de Motores Estándar por Motores de Alta Eficiencia.....	21
XIII. Metodología para Diagnosticar Energéticamente un Motor Eléctrico de Inducción.....	22
XIII.1 Recopilación de datos del motor:	22
XIII.2 Realización de mediciones.....	23
XIII.3 Análisis de carga por el método de deslizamiento.....	23
XIII.4. Análisis energético con el factor de carga referido a la potencia de placa del motor	25
XIII.5. Determinación de la acción de ahorro.....	29
XIII.6. Evaluación económica de ahorro.....	33
XIV. Fallas en Motores Eléctricos.....	34
XIV.1. Condiciones ambientales adversas.....	34
XIV.2. Altura sobre el nivel del mar	35
XIV.3. Selección o aplicación incorrecta del motor	35
XIV.4. Instalación inadecuada.....	36
XIV.5. Desperfectos mecánicos	36
XIV.6. Fallas eléctricas.....	36
XIV.7. Desbalance de voltaje	37
XIV.8. Mantenimiento impropio	37
XIV.9. Fallas por operación con una sola fase.....	37
XV. Rebobinado en Motores Eléctricos.....	38
XV.1 Procesos de rebobinado.....	38
XV.2. Recomendaciones para el rebobinado de motores.....	39
XVI. Aplicación de Convertidores de Frecuencia Variable.....	41
XVI.1. Introducción.....	41
XVI.2. Teoría de funcionamiento del convertidor de frecuencia.....	41
XVI.3. Componentes de un convertidor de frecuencia variable.....	42
XVI.4. Aplicaciones de los convertidores de frecuencia.....	43
XVI.5. Clasificación de las Cargas de los Motores	43
XVI. 6. Ahorro de Energía con Variadores de Velocidad Electrónicos.....	45
XVI.7. Beneficios y ventajas de la aplicación de convertidores.....	50



TABLA DE SIMBOLOGÍA

ASM	Altura sobre el nivel del mar
BHP	Brake Horse Power o Caballo de Potencia en la Flecha
° C	Grados centígrados
CA	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa
CFV	Convertidor de frecuencia variable
Cos	Coseno
D	Diámetro del impulsor
ET	Elevación de temperatura
f	Frecuencia de alimentación
f.int	Factor de interpolación
FC	Factor de Carga
FP	Factor de Potencia
F.P.Trifásico	Factor de Potencia Trifásico
FIDE	Fideicomiso para el Ahorro de Energía
HP	Horse Power o Caballo de Potencia
Hz	Hertz
I1, I2, I3	Corriente por fase
I1-2-3	Corriente trifásica
I ² R	Intensidad al cuadrado por resistencia
K	Es una constante, igual a 7,124
kV	Kilovoltios
kW	Potencia demandada
kWh	Consumo de energía eléctrica kilo Watt Hora
mm	Milímetros
n	Velocidad del rotor
n	Número de revoluciones por minuto.
NEC	National Electrical Code (código eléctrico nacional de USA)
Ns	Velocidad de sincronismo, en revoluciones por minuto.
Nm	Newton por metro
p	número de pares de polos.
p	Número de polos del devanado del estator
Pot	Potencia al freno, requerida por el equipo
PWM	modulación del ancho del pulso
Q	Flujo, unidades de volumen entre tiempo
r.p.m	Revoluciones por minuto
SCR	rectificadores controladores de silicio
TA	temperatura de ambiente
V1-2, V1-3, V2-3	Voltaje entre fases
V1-2-3	Voltaje trifásico
s	Velocidad de deslizamiento



I. Introducción.

La capacidad instalada de generación eléctrica en Centroamérica depende cada vez más de los hidrocarburos importados, lo cual aumenta la vulnerabilidad energética de la región y provoca un aumento en las emisiones de gases efecto invernadero.

Conforme aumentan los costos de generación de electricidad y la demanda promedio continúa creciendo a un 6% anual, de cara a un entorno regional de mayor competitividad y mayor desarrollo socio-económico, las necesidades de la nueva capacidad instalada aumentan exponencialmente.

El equipamiento eléctrico utilizado en la mayoría de los procesos industriales y en la infraestructura comercial presenta bajos niveles de rendimiento; ello, aunado a que el equipo ha sobrepasado su período de vida útil o se acerca a ese límite, provocando considerables desperdicios energéticos. Esto se traduce en un incremento en los costos de producción y costos operativos.

Para emprender el desarrollo de mercados sostenibles en torno al uso final eficiente de la electricidad, se requiere eliminar una serie de barreras de tipo político, financiero, técnico y de información.

BUN-CA y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), con el financiamiento del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF), desarrollan el “*Programa Regional en Eficiencia Energética para los Sectores Industrial y Comercial en América Central*” (PEER), iniciativa que contribuye, entre otros objetivos, a remover las barreras de la falta de conocimiento e información técnica en la pequeña y mediana empresa centroamericana.

El presente Manual tiene el objetivo específico de fortalecer la plataforma de conocimiento en el nivel centroamericano y brindar las bases para el desarrollo técnico necesario, a fin de realizar una adecuada selección y uso de motores eléctricos. Este texto brinda información técnica sobre los conceptos de motores eléctricos, así como de las buenas prácticas que deben ser implementadas para lograr un uso eficiente del equipo.

Este Manual está dividido en 16 Capítulos, en el Capítulo I es una introducción que aborda la importancia y variedad de uso de los motores eléctricos; el capítulo II presenta los diferentes tipos de motores eléctricos, tanto los de corriente continua o directa y los de corriente alterna; el Capítulo III hace referencia al concepto de pérdidas de energía que inevitablemente ocurren en el motor eléctrico e introduce al tema de eficiencia; El capítulo IV analiza el tema de la eficiencia energética y resalta su importancia desde los puntos de vista de la potencia entregada y la que se demanda eléctricamente; el Capítulo V muestra la forma en que es afectada la operación del motor cuando trabaja en condiciones de alimentación eléctrica diferentes a las de sus especificaciones eléctricas, se analiza tanto la variación de voltaje como el desbalanceo de las fases eléctricas; en el Capítulo VI presenta el concepto de factor de carga, lo relacionada con la eficiencia para diferentes regimenes de trabajo; luego en el Capítulo VII se refiere al tema del factor de potencia de los motores eléctricos, relacionando la potencia activa y la necesaria potencia reactiva; pasamos al Capítulo VIII aquí el enfoque es sobre los diferentes estados de trabajo en que puede operar un motor en función al trabajo que desempeña, en ocasiones el máximo, pero en otros momentos a baja carga, a la descripción de su operación le llamamos perfil de carga y es analizado en este capítulo; seguimos con el factor de servicio en el Capítulo IX que informa la capacidad adicional de potencia que puede entregar el motor eléctrico; el Capítulo X, es muy importante porque se refiere a cuál debe ser el tamaño o potencia apropiada de un motor eléctrico, considerando siempre la potencia que debe entregar al equipo que le dé servicio; en el Capítulo XI, se comenta sobre la opción de reemplazar los motores sobredimensionados, es decir aquellos que son de mayor capacidad en potencia que lo que entregan al equipo acoplado; hablando de eficiencia energética resulta conveniente sustituir los motores de eficiencia estándar por otros de alta eficiencia ello es comentado y mostrado gráficamente en el capítulo XII; dentro de los capítulos mas relevantes se encuentra el XIII, ahí se



presenta el proceso metodológico que debe aplicarse para evaluar un motor eléctrico y determinar su eficiencia de operación, esta es la base fundamental para sustituir o no el motor eléctrico, y en caso afirmativo valorar los beneficios de la sustitución; el Capítulo XIV complementa el manual haciendo resaltar las fallas más comunes en los motores eléctricos; a menudo surge la pregunta cuando falla un motor eléctrico: ¿será este momento más conveniente para cambiar el motor en lugar de repararlo, este aspecto es comentado en el penúltimo Capítulo que es el XV; otra acción de ahorro en los motores eléctricos es la adopción de un convertidor de frecuencia variable; este tiene la virtud de disminuir el consumo eléctrico en motores que trabajan en condiciones variables de carga, esto es analizado en el último capítulo el XVI.

Este manual es un medio para acercar el conocimiento general del ahorro de energía en motores eléctricos a quienes se encuentren interesados en el tema, en él encontrarán se da prioridad al tema de la eficiencia energética, por tanto aspectos como diseño, manufactura, y otros semejantes no son abordados. Tampoco se pretende que quien lea esta manual se constituya como un experto en el tema, para tal fin sería necesario complementar ampliamente la materia y proceder a la aplicación de los conocimientos.

BORRADOR FINAL



I.1 Ventajas de la utilización de motores eléctricos.

En las actividades industriales y muchas comerciales es necesario mover distintos procesos productivos, maquinaria y equipos diversos, como ventiladores, bandas transportadoras, bombas de agua, escaleras eléctricas, compresores, taladros, entre un sin fin de aplicaciones que requieren movimiento. La forma más fácil de llevar a cabo ese movimiento es mediante un motor eléctrico tal y como se muestra en la Figura 1.

Fig 1. Motores Eléctricos conectados un compresor de refrigeración y a bombas centrifugas



Los motores eléctricos cubren toda la gama de aplicaciones que la sociedad moderna exige, los podemos encontrar tan pequeños como los usados en el giradiscos de un DVD, o un pequeño juguete, tan cotidianos como el de una licuadora, un ventilador o un acondicionador de aire; pero también los hay tan grandes como los que necesitan las industrias para mover, molinos, trituradoras, compresores, mezcladoras. Existen grandes industrias como las llanteras o productoras de cemento que llegan a utilizar motores de miles de caballos de potencia, en sus banburis (molinos para preparar la mezcla inicial).

Otra cualidad que distingue a los motores eléctricos es su larga vida se puede decir que en potencias industriales deben durar por lo menos 10 años, no obstante en inmensidad de lugares existen motores con más de 30 años de vida y en muchas industrias existen motores que rebasan esa edad.

Una ventaja más son los altos rendimientos que de ellos se obtiene, en motores pequeños (menos de 1 hp) su eficiencia es del orden del 80%, pero en grandes capacidades llegan hasta el 96% de eficiencia. Las eficiencias de los motores eléctricos son en general muy superiores a la de los motores de combustión interna equivalentes, por ejemplo, un motor diesel tiene un rendimiento aproximado al 40%.

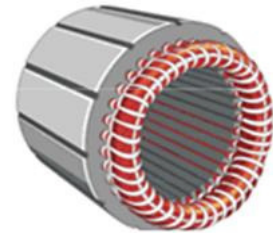
Además los motores eléctricos se pueden construir en todos los tamaños imaginables, y son mucho más adaptables, silenciosos y menos contaminantes que los motores de vapor o de explosión, gasolina o diesel.

II. Tipos de Motores

La finalidad de los motores eléctricos es convertir la energía eléctrica, en forma de corriente continua o alterna, en energía mecánica apta para mover los accionamientos de todo tipo de máquinas. Los motores eléctricos están conformados por dos partes un estator fijo y un rotor móvil.

Estator fijo. Es la parte externa del motor que no gira, en el se encuentra la capacidad magnética del motor, está integrado por polos magnéticos (imanes) y un embobinado de alambres de cobre (Fig 2). El motor eléctrico usa los polos magnéticos (que funcionan como imanes) para producir el movimiento del rotor. El accionar de los motores se basa en la ley fundamental de los imanes: Cargas opuestas se atraen e iguales se repelen.

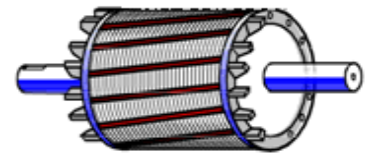
Fig 2. Forma del estator de un motor eléctrico



Dentro de un motor eléctrico por el embobinado de cobre circula corriente eléctrica, que a su vez genera su campo magnético, asegurando con ello que los polos magnéticos del rotor siempre se encuentren en repulsión, huyendo del estator por la similitud de cargas. Entonces las fuerzas de atracción y repulsión producen el movimiento del rotor al cual se le agrega una extensión llamada flecha o eje que luego es acoplada al equipo que requiere aprovechar el movimiento que se está produciendo.

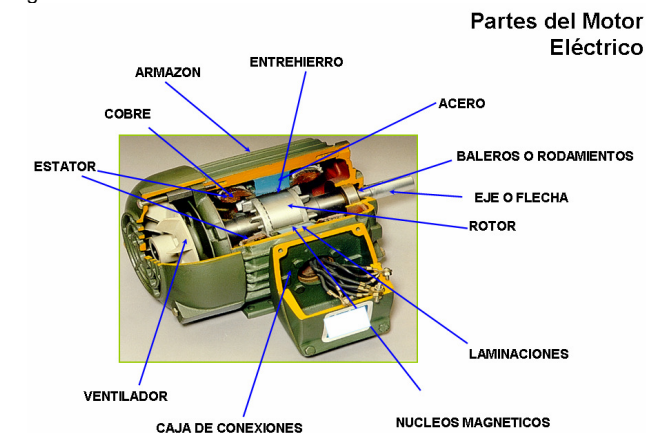
1. **Rotor móvil.** Es la parte del motor que gira a gran velocidad, debido a la acción de los campos magnéticos creados en el motor, su velocidad de rotación expresada en revoluciones por minuto (r.p.m) depende del número de polos magnéticos del estator (Fig 3). Se apoya en cojinetes de rozamiento o de baleros. El espacio comprendido entre el rotor y estator es constante y se denomina entrehierro.

Fig 3. Forma del rotor de un motor eléctrico



En la Figura 4 se detallan las partes de un motor eléctrico.

Fig. 4. Partes del motor eléctrico



Fuente: FIDE

II.1 Motores de corriente directa.

La corriente eléctrica que distribuyen las empresas eléctricas es del tipo alterna, sin embargo hay muchas más aplicaciones que utilizan la corriente en forma directa, por ello los motores eléctricos pueden ser de corriente directa o de corriente alterna.

Los motores de corriente directa o continua como también se les llama, presentan la ventaja de tener una gran capacidad para regular la velocidad de rotación del motor, lo cual los hace necesarios en ciertos tipos de aplicaciones, en los cuales se precisa un ajuste fino de la velocidad y torque.

En estos motores, el estator está formado por polos principales activados por corrientes continuas. Suelen llevar además polos auxiliares y en grandes potencias polos de compensación. El rotor se alimenta con corriente continua a través del colector y las escobillas.

Los devanados del estator pueden alimentarse de diferentes formas, dando lugar a motores de características distintas.

- ✚ *En derivación.*- El estator se alimenta con la misma tensión de alimentación que el inducido.
- ✚ *Independiente.*- El estator se alimenta con una fuente de corriente continua independiente.
- ✚ *Serie.*- La intensidad que atraviesa los devanados del estator es la misma que alimenta el inducido.
- ✚ *Compuesto.*- Es una combinación de las características Serie y Derivación.

No obstante los motores de corriente directa necesitan una alimentación especial diferente a la que suministran las empresas eléctricas, por ello utilizan equipos adicionales como rectificadores de potencia, con los que la corriente alterna es convertida a directa; así como en ocasiones baterías de reserva lo cual incrementa los costos del motor y de la instalación.

Por las grandes ventajas que tiene recibir la corriente alterna, la gran mayoría de los equipos que requieren de un motor eléctrico utilizan motores de corriente alterna, preferentemente en forma trifásica, aunque existen muchos motores de baja potencia que reciben solo una fase eléctrica (monofásicos).

Actualmente, producto del alto desarrollo tecnológico, los motores de corriente alterna también pueden variar la velocidad y torque que entregan al equipo acoplado, para ello deben instalarse en combinación con un regulador electrónico de velocidad variable, conocidos en el lenguaje industrial como "Drivers", "Variadores de Frecuencia" ó "Convertidores de Frecuencia Variable".

Esta poderosa ventaja está haciendo que los motores de corriente directa sean paulatinamente reemplazados por motores de corriente alterna con variador de velocidad integrado. De hecho gran parte de la maquinaria nueva ya no incluye motores de corriente directa. Otra desventaja de los motores de corriente directa es que precisan un mantenimiento mayor que los motores de corriente alterna y cada mantenimiento es bastante costoso. El colector y las escobillas necesitan mucha atención y cuidados.

Los motores de corriente continua presentan la ventaja de una gran capacidad para la regulación de la velocidad, lo cual los hace necesarios en ciertos tipos de aplicaciones, en los cuales se precisa un ajuste fino de la velocidad y del par motor.



Sin embargo, presentan los siguientes inconvenientes:

⚡ Alimentación.

La generación y distribución de energía eléctrica se realiza en corriente alterna. Estos motores necesitan una alimentación especial, mediante equipos rectificadores de potencia, así como en ocasiones baterías de reserva lo cual incrementa los costos de la instalación.

⚡ Mantenimiento.

Precisan un mantenimiento mayor que los motores de corriente alterna y son bastante más costosos. El colector y las escobillas necesitan mucha atención y cuidados.

Los colectores deben tener una superficie lisa y girar de forma completamente circular. Debe evitarse la aparición de fuego o chispas debajo de las escobillas, que pueden ser debidas a marcha no circular del colector, vibraciones, escobillas gastadas, etc.. El colector se debe torneear periódicamente, granos de polvo pueden rayarlo. Estas circunstancias los hacen poco adecuados para trabajar en atmósferas sucias o ambientes explosivos.

II.2 Motores de corriente alterna: síncronos y asíncronos.

Los motores de corriente alterna son por mucho los más empleados, dada la gran ventaja de poder funcionar con la forma de corriente que suministran las empresas eléctricas, no requieren pasar la corriente alterna a corriente directa, por tanto son de menor costo. Se clasifican en motores asíncronos (o de inducción) y motores síncronos. En los síncronos el eje gira a la misma velocidad que lo hace el campo magnético, en los asíncronos el eje se revoluciona a una velocidad poco menor a la del campo magnético.

Los motores asíncronos basan su funcionamiento en la creación de un campo magnético giratorio en el entrehierro, debido a la circulación de corriente alterna por los devanados trifásicos y la influencia de los polos magnéticos del estator. La velocidad de giro de este campo magnético en revoluciones por minuto (r.p.m.), es:

$$n_s = \frac{120 \times f}{p}$$

donde :

f = Frecuencia de alimentación

p = Número de polos del devanado del estator.

Ns = Velocidad de giro, en revoluciones por minuto.

Ejemplo: Se suministra energía eléctrica a un motor de 20 HP de dos polos a una frecuencia de 60 Hz, ¿Cuál será la velocidad sincronía del motor?

$$n_s = \frac{120 \times f}{p} = \frac{120 \times 60}{2} = 3600 \text{ rpm}$$

La velocidad de giro de un motor eléctrico está determinada por el número de polos magnéticos, entre más polos el motor revoluciona más lentamente, la Tabla 1 indica la velocidad de giro del campo magnético en función del número de polos y para una frecuencia de 60 Hz.



Tabla 1. Número de polos y velocidad de sincronía de los motores

No. de Polos	2	4	6	8	10	12
Velocidad en rpm	3600	1800	1200	900	720	600

Fuente: BUN-CA.

La razón para utilizar motores de menor velocidad es para incrementar el torque o par, que puede entregar el motor. Este término se refiere al equivalente de fuerza por distancia que es capaz de ejercer un motor en cada giro. El giro de un motor tiene dos características: el par motor y la velocidad de giro.

El par motor se expresa y mide en Newton-m (Nm); un par de 20 Nm, es igual al esfuerzo de tracción de 20 Newtones, aplicado a un radio de un metro.

Un ejemplo práctico para comprender la diferencia entre par y potencia lo podemos observar en los pedales de una bicicleta; en donde el motor sería la persona que pedalea, y el par motor, en ese caso, la presión o fuerza que ejerce sobre los pedales. Si por ejemplo, la persona conduce su bicicleta a una determinada velocidad fija, digamos unos 15 km/h, con un engrane grande, dando 30 vueltas por minuto; estaría generando una potencia determinada; ahora sí reduce la velocidad de giro a 15 las revoluciones por minuto, para generar la misma potencia tendría que emplear el doble de par; pues deberá hacer el doble de fuerza con cada pedaleada para mantener la velocidad de 15 km/h.

La potencia puede ser calculada si se conoce el torque requerido por el equipo, mediante la siguiente ecuación:

$$Potencia = \frac{Torque(Nm \text{ o } pie-libra) \times r.p.m}{K}$$

donde: Potencia será expresada en HP o kW, dependiendo de las unidades empleadas
K es una constante, igual a 7,124 si T esta en Nm; y 5,250 si T esta pie- libra.

Ejemplo: Si el torque requerido para un agitador es de 15 Nm, y se requiere una velocidad de 3,600 r.p.m, ¿cuál será la potencia nominal del motor para satisfacer esta carga?

$$HP = \frac{15 \text{ Nm} \times 3,600 \text{ r.p.m}}{7,124} = 7.58 \text{ HP}$$

En los motores eléctricos, el par aumenta para mantener la velocidad cuando la resistencia al giro es mayor, esto se logra incrementado en número de polos; en operación sí el voltaje se mantiene constante, el aumento de par incrementa la corriente consumida.

Deslizamiento.

Ya se menciona que los motores asíncronos no giran a la velocidad del campo magnético, llamada sincronía, sino que lo hacen a una velocidad muy próxima, se llama deslizamiento "s", a la diferencia entre la velocidad de sincronismo n_s y la del rotor n , expresada como un porcentaje de la velocidad de sincronismo:

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100$$



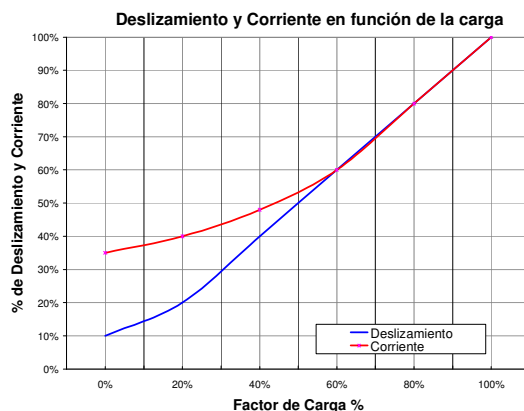
Ejemplo: Un motor de 2 polos a 60 Hz tiene una velocidad a plena carga de 3,550 r.p.m., determinar el deslizamiento del mismo.

$$S = \frac{3600 - 3550}{3600} \times 100 = 1.39\%$$

O sea el motor de nuestro ejemplo gira a una velocidad del 1.39% de la velocidad de sincronía cuando entrega su potencia nominal.

Por este motivo, los motores asíncronos no pueden funcionar a cualquier velocidad, sino a una serie de velocidades cercanas a la de sincronismo, como lo indica el Gráfico 1. A medida que el motor ocupa menos carga su deslizamiento es menor, su velocidad de rotación se aproxima más a la de sincronismo; igualmente la corriente nominal solo se demanda cuando la carga es del 100%, en la medida que el motor este a menor carga se solicita menos corriente, cuando se queda en vacío puede demandar más del 25% de su corriente de placa.

Gráfico 1. Comportamiento del Deslizamiento y Corriente



Fuente: BUN-CA

II.3 Motor síncrono.

Los motores síncronos sustituyen a los motores asíncronos solamente en aplicaciones que requieren características especiales. Se utilizan en grandes industrias que cuentan con aplicaciones de velocidad baja además de constante y ser de alta potencia, como: molinos, mezcladoras, trituradoras. En la pequeña y mediana empresa son prácticamente innecesarios.

Una de las ventajas más importantes de los motores síncronos es que su factor de potencia puede llegar a tener valores iguales a uno, e incluso se puede fabricar con $\cos \phi$ capacitivo, es decir, con la intensidad adelantada respecto de la tensión, pudiéndose utilizar por tanto como generadores de potencia reactiva, compensando así la instalación y evitando recargos por consumo de potencia reactiva, es decir, disminuyendo el costo de la facturación eléctrica. La eficiencia de los motores síncronos con $\cos \phi = 0.8$ en adelante es entre 0.5 a 1 % más bajo que con un factor de potencia de la unidad.



III. Pérdidas de Energía y Eficiencias.

En la transformación de energía eléctrica en mecánica, que tiene lugar en los motores eléctricos, una parte de la energía eléctrica tomada de la red se convierte en calor, constituyendo las pérdidas del motor. (Fig 5)

Las pérdidas de un motor de inducción pueden agruparse en dos bloques: las que dependen del índice de carga del motor, y las que son independientes de la carga. La magnitud de ambos tipos dependen del diseño, construcción del motor, materiales y calidad del proceso de manufactura.

Una distribución en forma de ejemplo de las pérdidas en función de la potencia se muestra en la Tabla 2. Así mismo, en la Tabla 3 se muestra en porcentajes las pérdidas típicas de un motor abierto de 1800 r.p.m.

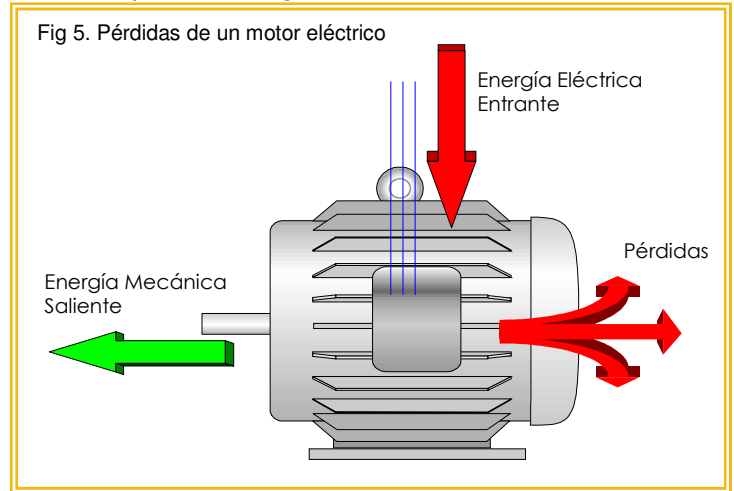


Tabla 2. Tipo de pérdidas

Tipo de Pérdidas	Donde Ocurren	Que factores las determinan	Como se disminuyen
Independientes del índice de carga	Núcleo, armazón, rodamientos, ventilador	Tipo, calidad y cantidad del material magnético Capacidad de eliminar el calor Fricción entre las partes rodantes Tipo de material aislante	Empleando acero de mejor calidad magnética, como acero al silicio Con una armadura diseñada para disipar mejor el calor Utilizando un material aislante que resista mayor temperatura Con un ventilador de enfriamiento de diseño aerodinámico Utilizando baleros antifricción
Dependientes del índice de carga	Estator y Rotor	La potencia entregada por el motor reflejada por el índice de carga y la corriente eléctrica su magnitud es el cuadrado de la corriente por la resistencia eléctrica del conductor I^2R	Utilizando conductores de mejor calidad con menor resistencia eléctrica Con un diámetro adecuado y mayor cantidad del conductor eléctrico, más cobre Mayor área de laminación Espacio del entrehierro mas estrecho

Fuente: BUN-CA

Tabla 3. Distribución típica de pérdidas de un motor abierto

Tipos de Pérdidas	Potencia del Motor en HP		
	25	50	100
Estator	42%	38%	28%
Rotor	21%	20%	18%
Núcleo	15%	14%	13%
Ventilación y fricción	7%	10%	14%
Adicionales	15%	18%	27%
Total	100%	100%	100%

Fuente: BUN-CA

IV. Eficiencia.

La eficiencia de un motor es la relación entre la potencia mecánica de salida y la potencia eléctrica de entrada. Este es el concepto más importante desde el punto de vista del consumo de energía y del costo de operación de un motor eléctrico. La eficiencia se puede expresar de las siguientes maneras:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia Mecánica de salida}}{\text{Potencia Eléctrica que entra}}$$

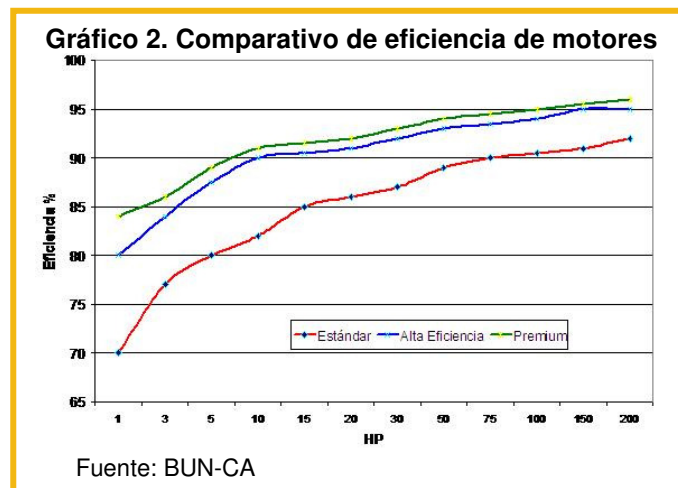
$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia Eléctrica que entra} - \text{Pérdidas}}{\text{Potencia Eléctrica que entra}}$$

El valor más alto de eficiencia es la unidad (1), en el caso ideal si las pérdidas fueran cero, como lo indica la segunda expresión. Los fabricantes de motores hacen innovaciones tecnológicas tendientes a disminuir las pérdidas al máximo posible empleando materiales de alta calidad y un proceso de mejora continua en la fabricación.

Según la eficiencia, los motores eléctricos se clasifican en tres tipos:

1. *Motores de eficiencia estándar:* no consideran la eficiencia como la principal cualidad, más bien privilegian la funcionalidad y precio, prácticamente los motores con más de 15 años podrían considerarse de eficiencia estándar.
2. *Motor de alta eficiencia:* surge en la década de los años noventa, como consecuencia de contrarrestar los altos precios de la energía y por la necesidad evidente de hacer un uso eficiente y racional de la energía.
3. *Motor Premium:* La innovación de los motores premium se basa en elevar aún más la eficiencia de los motores eléctricos, para ello se ha perfeccionado su proceso de manufactura y se utilizan materiales de alta calidad, lo cual implica que su costo es también más elevado.

En el Gráfico 2 se muestran las eficiencias de los diferentes tipos de motores.



IV.1 Selección del motor.

En la selección de motores eléctricos deben considerarse los siguientes parámetros.

- Potencia requerida por la aplicación
- Eficiencia
- Tipo de carcasa (abierto, cerrado)
- Factor potencia
- Factor de servicio
- Velocidad en rpm
- Temperatura de operación y del ambiente
- Torque necesario
- Tipo de aislamiento

Otros conceptos a considerar son:

- Rango del factor de potencia
- Torque requerido para vencer la inercia
- Número de arranques esperados

Información sobre el medio ambiente:

- Corrosivo o no corrosivo, explosivo
- Altitud
- Tipo de suciedad
- Niveles de humedad
- Peligroso o no peligroso

También es importante observar requerimientos de protección térmica, facilidad de mantenimiento, y espacio de calefacción y otros para prevenir la falla o desgaste prematuro del motor.

IV.2 Tipos de carcasa.

La carcasa es la superficie envolvente del motor eléctrico, existen tipos diversos, algunos de ellos son:

Abierto: Una carcasa abierta con ventilador, esto permite el paso del aire frío sobre y alrededor de los bobinados del motor. Este tipo es ocupado en pocas ocasiones

Abierto aprueba de goteo: Es un motor abierto en el cual la ventilación impide la entrada de líquidos o sólidos al motor, en un ángulo menor a 15 grados con la vertical, ya sea en forma directa o por choque y flujo por una superficie horizontal o inclinada hacia adentro.

Resguardado o protegido: Es un motor abierto donde las aberturas conducen el aire de enfriamiento directamente a partes vivas o giratorias, exceptuando los ejes lisos del motor, tienen acceso limitado a sus partes mediante estructuras, parrillas o metal desplegado, etc. protegiendo el contacto accidental con partes giratorias o eléctricas.

Aprueba de chorro y salpicaduras: Este es un motor abierto en el cual la ventilación impide la entrada de líquidos o sólidos en cualquier ángulo menor de 100 grados de la vertical.

Abierta a prueba de lluvia. Es abierta con conductos de ventilación diseñados para reducir al mínimo la entrada de lluvia y partículas suspendidas en el aire a las partes eléctricas del motor.



A prueba de agua. Totalmente cerrada para impedir que entre agua aplicada en forma de un chorro o manguera, al recipiente de aceite y con medios para drenar agua al interior, como una válvula de retención o una abertura en la parte inferior del armazón, para conectar el drenado.

Encapsulados: Es un motor abierto en el cual el embobinado está cubierto con un revestimiento de material fuerte para proporcionar protección contra la humedad, suciedad y contra sustancias abrasivas.

Totalmente cerrado: Es un motor cerrado para evitar el libre intercambio de aire entre la interior y exterior de la cubierta, pero no es hermético.

Totalmente cerrado sin ventilación: Es un motor totalmente cerrado el cual está diseñado para no ser enfriado por medios externos.

Totalmente cerrado con ventilador enfriador: Es un motor totalmente cerrado con un ventilador para soplar aire a través de la carcasa externa. Esto son comúnmente utilizados en atmósferas; corrosivas, sucias y polvosas.

A prueba de ignición de polvos. Totalmente cerrada diseñada y fabricada para evitar que entren cantidades de polvo que puedan encender o afectar el desempeño del motor.

A prueba de explosiones. Totalmente cerrado diseñado para impedir una ignición de gas o vapor alrededor de la máquina por chispas, flama, o explosión dentro de la máquina impidiendo que salgan fuera de la carcasa.

IV.3 Aislamiento del motor.

La temperatura ambiente juega un papel importante en la capacidad y selección del tamaño de un motor, parte importante del motivo es que la temperatura ambiente influye en la elevación permisible de temperatura por sobre los 40° C normales. Por ejemplo un motor que trabaje a una temperatura ambiente de 75° C empleando aislamiento clase B tiene un aumento permisible de temperatura de tan solo 55° C. Si trabajara a su temperatura ambiente normal de 40 ° C se podría permitir un aumento de temperatura de 90° C, sin dañar su aislamiento.

Tipos de aislamiento.

Los materiales empleados en aislamientos de motores y máquinas eléctricas pueden ser diferentes tipos, según se detallan en la Tabla 4.



Tabla 4. Materiales aislantes.

Clase de Aislamiento	Productos empleados	Medio Aglomerante o Impregnante	Temperatura máxima de empleo (°C)
A	Esmaltes de acetato de polivinilo, poliuretano. Aglomerado con celulosa	Melamina con fomaldehido, fenol con formaldehido	120
B	Fibras de vidrio, productos de mica, esmaltes de politeraftalatos, films de policarbonato	Goma, laca, compuestos asfálticos o bituminosos, resinas alkideas, resinas de poliéster, melamina y formaldehidos	130
F	Fibras de vidrio, amiato, productos de mica, fibras de poliamidas aromáticas, films de poliéster - imida	Resina epoxi Resinas de Poliuretano Resinas de silicona	155
H	Fibras de vidrio, amiato, productos de mica, fibras de poliamidas aromáticas y de poliamida, polietrafluoroetileno, cauchos silicona	Resinas de silicona	180
C	Porcelana, mica, cuarzo, vidrio u otro material cerámico, polietrafluoroetilino	Resinas de silicona	> 180

Fuente: BUN-CA.

IV.4 Resistencia del aislamiento.

Una vez instalado y montado el motor, debe de medirse con un ohmiómetro el aislamiento a tierra y entre fases del motor. Esta prueba debe hacerse obligatoriamente cuando el motor haya permanecido mucho tiempo almacenado o fuera de servicio.

Deben obtenerse como mínimo los valores siguientes:

- Motores de baja tensión

$$\text{Resistencia del aislamiento (ohmios)} = 1,000 \times \text{Tensión (Volts)}$$

- Motores de alta tensión

$$\text{Resistencia del aislamiento (ohmios)} = \frac{1,000 \times \text{Tension (Volts)}}{\text{Diametro del rotor (metros)}}$$



IV.5 El par en motores de inducción.

Según la aplicación que se dará al motor eléctrico será necesario hacer corresponder el par o torque que se requiere. A continuación se indica los diferentes tipos que podemos encontrar.

Par a Plena Carga.

El par a plena carga es el necesario para producir la potencia de diseño a la velocidad de plena carga. El par a plena carga de un motor es a la vez base de referencia para indicar el par de arranque y el par máximo, que se expresan en un cierto porcentaje del par a plena carga.

Par de Arranque.

El par de arranque o a rotor bloqueado, es el torque que el motor desarrolla cuando deja la inercia.

Par Máximo.

Es el máximo torque que desarrolla el motor, es expresado como un porcentaje del torque a plena carga. El par máximo de los motores ordinarios varía entre 1.5 y 3 veces del par de plena carga.

La Tabla 5 indica cual es el tipo de diseño del motor y la aplicación. (Estándares de diseño eléctrico NEMA)

Tabla 5. Diseño del motores y su aplicación

Clasificación	Torque de Arranque (% de torque a plena carga)	Torque de Máximo (% de torque a plena carga)	Corriente de Arranque	Deslizamiento	Aplicación Ejemplo
Diseño B Torque de arranque bajo y corriente de arranque normal	100 a 200%	200 a 250%	Normal	menor al 5%	Ventiladores, Sopladores, bombas, compresores y en general equipos centrífugos.
Diseño C Torque de arranque alto y corriente de arranque normal	200 a 250%	200 a 250%	Normal	menor al 5%	Agitadores, bombas, compresores reciprocantes y equipos semejantes
Diseño D Torque de arranque bajo y alto deslizamiento	250 a 275%	275%	Baja	mayor al 5%	Bombas de pozo, de vacío, extractores, elevadores, molinos, mezcladoras, etc

Fuente: Ing. Alfredo Aguilar, Consultor.

Los motores de diseño B son por mucho los más comunes y satisfacen todas las aplicaciones con excepción de alto torque de arranque o elevados picos en la carga.



V. Efectos debido a la calidad de suministro.

Los motores eléctricos están diseñados para operar a un voltaje y frecuencia específicos y su funcionamiento será satisfactorio siempre que el voltaje y frecuencia aplicado no varíe más allá de ciertos límites.

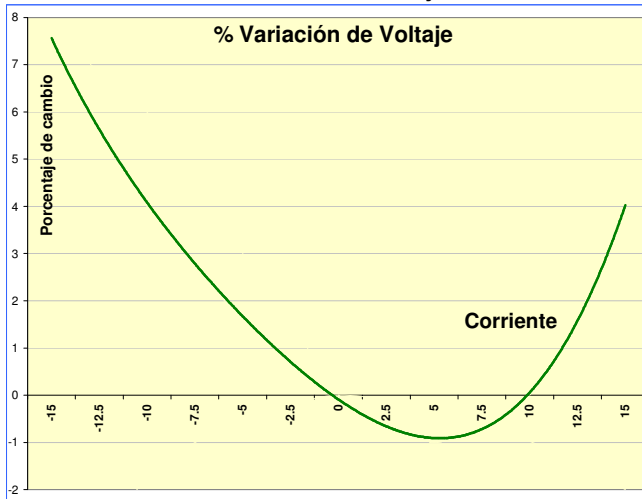
➤ Variación de voltaje y frecuencia.

Todos los motores están diseñados para funcionar con las siguientes tolerancias:

- ✘ Una variación de voltaje de $\pm 10\%$ con respecto al nominal, con una frecuencia igual a la de placa.
- ✘ Una variación de frecuencia de $\pm 10\%$ del nominal con alimentación de acuerdo al voltaje de placa.
- ✘ Cuando existe una variación combinada de voltaje y corriente, la suma aritmética de ambas no debe rebasar el 10% de los valores nominales, siempre que la variación de frecuencia no sea mayor a 5% de la nominal.

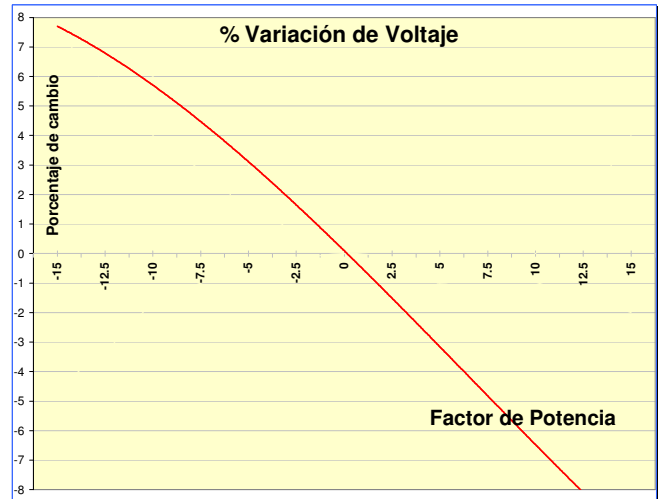
El 10% de variación de voltaje es un valor aceptable, para el buen funcionamiento del motor dado que el incremento en temperatura no será tal que pueda dañarlo. Normalmente es más común encontrar motores trabajando fuera de su voltaje nominal que de su frecuencia nominal.

Gráfico 3. Variación de Voltaje-Corriente



Fuente: BUN-CA

Gráfico 4. Variación de Corriente – Factor de Potencia



➤ Efectos por variaciones de voltaje:

- ✘ Un decremento en el voltaje incrementa la temperatura lo que reduce enormemente el aislamiento y la vida del motor (ver Gráfico 3).
- ✘ Un incremento en voltaje disminuye considerablemente el factor de potencia. Por el contrario, un decremento en voltaje resulta en un incremento en factor de potencia (ver Gráfico 4).



- ✘ El par de arranque es proporcional al cuadrado del voltaje. Por lo tanto, un decremento en voltaje resultará en una disminución del torque disponible.
- ✘ Las variaciones de voltaje afectan el deslizamiento del motor, por ejemplo, un incremento de 10% en voltaje resulta en una reducción del deslizamiento de aproximadamente 17%. Una reducción en el voltaje de 10% podría incrementar el deslizamiento alrededor de 21%.
- ✘ Un incremento o decremento en el voltaje disminuye la eficiencia del motor.

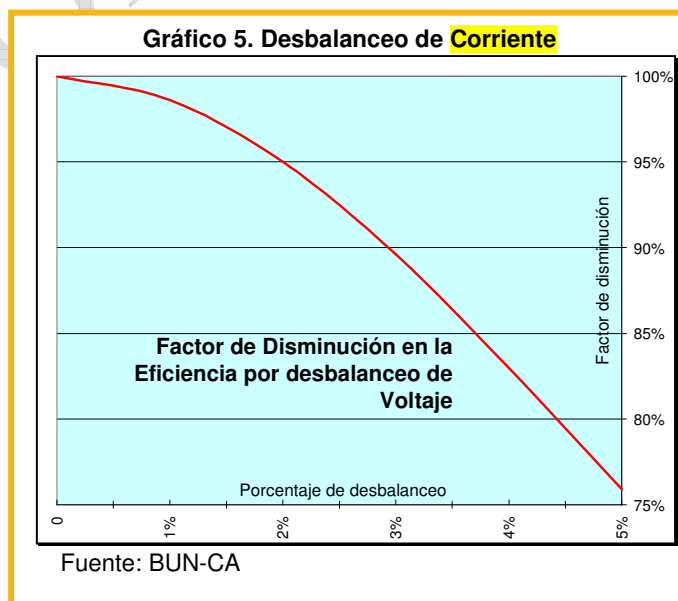
➡ Efectos por variaciones en la frecuencia:

- ✘ Una frecuencia mayor produce un incremento en la velocidad de operación.
- ✘ La mayor velocidad hace que disminuya el par que debe desarrollar el motor para dar la misma potencia.
- ✘ Una frecuencia más alta que la requerida mejora el factor de potencia y la eficiencia tiende también a incrementarse.
- ✘ Por otra parte, un decremento en la frecuencia genera un bajo factor de potencia, una disminución en la velocidad, mientras que el par de arranque y el máximo sufren un incremento.

➡ Desbalance de voltaje.

En un motor trifásico es indispensable que los voltajes entre líneas o fases estén bien balanceados, ya que un pequeño desbalanceo de voltaje tiene como resultado un desbalanceo de corrientes, así como un incremento en la temperatura sobretodo de la fase que recibe el menor voltaje, ocasionando la mayoría de fallas en motores, (ver Gráfico 5).

El desbalanceo de voltaje está definido como la máxima desviación de los voltajes de línea y el voltaje promedio del sistema trifásico, dividido entre el voltaje promedio. Si los voltajes están desbalanceados, la eficiencia del motor disminuirá a medida que aumente el desbalanceo de voltaje.



VI. Factor de Carga.

La potencia nominal de un motor eléctrico indica la potencia mecánica de salida o en el eje que es capaz de entregar el motor, el factor de carga es un índice que indica la potencia que entrega el motor cuando se encuentra ya en operación con relación a la que puede entregar. Así un motor de potencia nominal 40 HP que trabaja entregando solo 20 HP, estará trabajando al 50%.

$$\text{Factor de Carga} = \frac{\text{Potencia real entregada}}{\text{Potencia de placa del motor}}$$

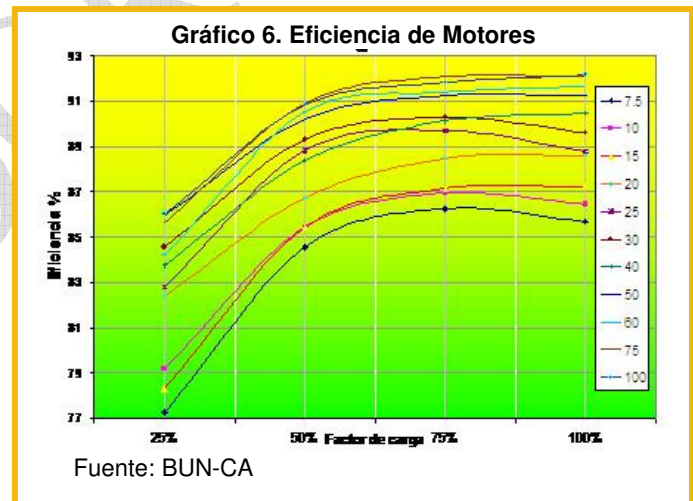
El factor de carga puede ser expresado en términos de un índice o bien en porcentaje. Indistintamente puede decirse que un factor de carga es de 50% o de 0.5. Es posible que el factor de carga sea mayor a la unidad, pues muchos motores se manufacturan para entregar mayor potencia a la nominal. Esa capacidad adicional de potencia la indica el factor de servicio del motor.

La mayoría de los motores no trabajan al 100% de su capacidad, de hecho es preferible que no lo hagan. El factor de carga es un índice que indica que porcentaje de la capacidad del motor esta siendo utilizada. Este concepto es muy estudiado por los fabricantes de motores eléctricos, y lo reportan relacionado con la eficiencia en sus manuales técnicos, a porcentajes del 100, 75, 50 y 25%. Un ejemplo de cómo es reportado este concepto lo muestra en la Tabla 7, y en forma gráfica, en el Gráfico 6.

Tabla 6. Eficiencia de Motores

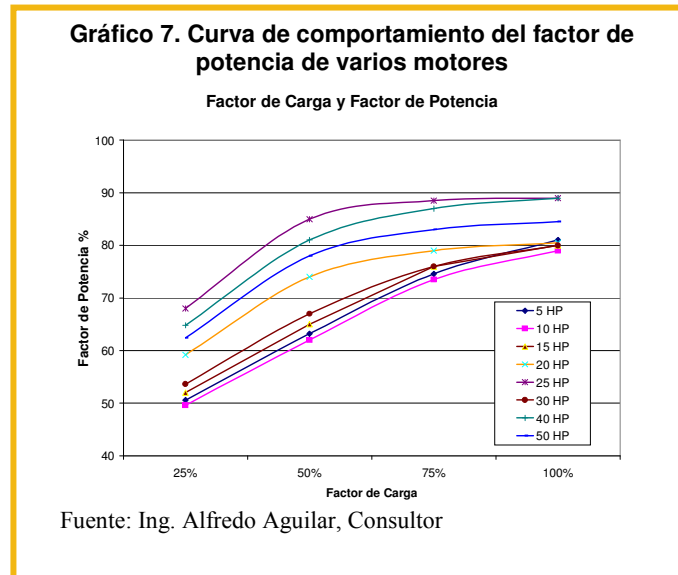
HP	EFICIENCIA			
Factor de Carga	25%	50%	75%	100%
7.5	77.25	84.55	86.25	85.68
10	79.2	85.43	86.93	86.44
15	78.3	85.43	87.15	87.24
20	82.4	86.73	88.48	88.6
25	82.8	88.83	89.7	88.78
30	84.55	89.3	90.28	89.6
40	83.75	88.38	90.13	90.48
50	85.95	90.2	91.25	91.24
60	85.9	90.53	91.4	91.66
75	85.65	90.9	92.08	92.08
100	86	90.83	91.83	92.18

Fuente: BUN-CA



VII. Factor de Potencia.

Los motores eléctricos requieren de la inducción electro magnética para poder operar, por ello la gran mayoría presentan un factor de potencia menor al 90%, que también disminuye aún más cuando se reduce el factor de carga. Los motores producen un bajo factor de potencia especialmente cuando trabajan por debajo del 50% de carga, (ver Gráfico 7).

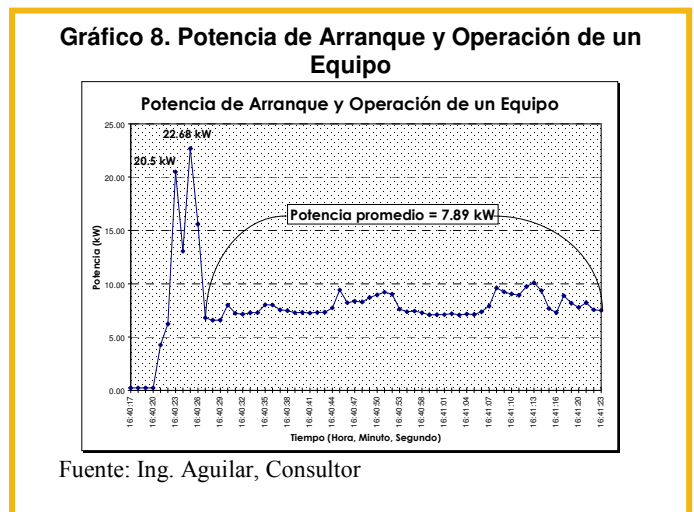


VIII. Perfil de Carga.

La función que desempeñan los motores eléctricos depende de las exigencias del equipo acoplado, el cual puede presentar variaciones en su régimen de trabajo, las mismas son transmitidas al motor eléctrico. Es importante conocer el perfil de carga del motor, que es la descripción de las variaciones de potencia a las que es sometido el motor en el ciclo de trabajo de la maquina acoplada.

El perfil de carga puede ser de un par de horas, un día, etc. esto dependerá del tipo de proceso, sin embargo, lo más importante es identificar y monitorear un tiempo suficiente para poder caracterizar el equipo electromotriz.

En el Gráfico 8 se ejemplifica un perfil de carga que muestra el arranque y desarrollo del motor hasta alcanzar la potencia eléctrica que le solicita el equipo acoplado. La gráfica muestra la relación tiempo y potencia eléctrica.



Tipo de carga de los motores.

Las cargas en las que trabajan los motores eléctricos varían conforme una gama incontable de servicios, sin embargo hay clasificaciones determinadas que engloban todos los conceptos y aplicaciones. En términos generales los tipos de carga se clasifican en:

- **Carga de par constante.** Es la carga que demanda del motor un par o torque constante en cualquier rango de velocidad, por ejemplo: elevadores, bandas transportadoras, maquinaria textil, impresoras, bombas de desplazamiento positivo y de pistón, extrusoras, mezcladoras, compresores recíprocos, etc.
- **Cargas de par variable.** Es el tipo de cargas en el cual las necesidades de par o torque cambian en el ciclo de trabajo, comúnmente en aplicaciones de flujo variable, como bombas, compresores y ventiladores centrífugos, agitadores, etc.
- **Cargas de potencia constante.** Es el tipo de aplicaciones en que no importa la velocidad a la que esté girando la carga, la potencia se mantiene en su valor máximo. Estas cargas se encuentran básicamente en bobinadoras, dobladores, troqueladoras, hiladoras, etc.

Muchas de las aplicaciones de velocidad variable utilizan reductores después del motor, debido a requerimientos de baja velocidad y par elevado, normalmente la reducción se realiza por medios mecánicos como engranes, bandas, etc.

- **Carga de velocidad constante, par constante.**

Algunas aplicaciones requieren de velocidad y par constante, tal como los extractores, ventiladores de flujo constante de cocinas y baños, ventiladores de aire a volumen constante, y bombas de circulación.

- **Carga de velocidad constante, par variable.**

Otra clase de carga puede requerir velocidad constante pero con par variable, por ejemplo una cortadora opera a la misma velocidad desembragada que cortando, una escalera mecánica opera a la misma velocidad independiente de la carga que transporta, lo mismo un transportador de cadenas.

- **Carga de velocidad y par variable.**

En estas aplicaciones varían tanto la velocidad como el par, este tipo de carga es el que ofrece el más alto potencial de ahorro de energía cuando se les aplica un convertidor de frecuencia variable.

IX. Factor de Servicio.

El factor de servicio es un indicador de la capacidad de sobrecarga que puede soportar un motor eléctrico, como ejemplo el valor de 1.1 significa que el motor puede trabajar al 110%; sin embargo esto no quiere decir que tenga que trabajar continuamente a ese valor, el factor de servicio debe entenderse como una capacidad adicional que posiblemente se llegue a ocupar en muy raras ocasiones, de hecho los motores sobrecargados reciben mayor corriente eléctrica que la nominal, calentándose en mayor medida y reduciendo notablemente su vida útil, además de bajar la eficiencia de su operación.

$$\text{Potencia máxima en sobrecarga} = \text{Factor de Servicio} \times \text{Potencia del Motor}$$

Ejemplo:



Un motor de 100 Hp tiene un factor de servicio de 1.15, que potencia puede desarrollar si este opera a su factor de servicio.

$$\text{Potencia} = (100 \times 1.15) = 115 \text{ Hp.}$$

X. Selección del Tamaño Adecuado del Motor.

En virtud de que la mayoría de los motores eléctricos presentan su mayor eficiencia al 75% de factor de carga, es conveniente que la elección de la potencia de un motor sea para que este trabaje al 75 % de carga. Así trabajara en el rango de alta eficiencia y tendrá un 25% de capacidad adicional para soportar mayores cargas de trabajo, evitando también el sobrecalentamiento del motor.

La potencia del motor eléctrico la determina el equipo acoplado, que la indica en BHP, Brake Horse Power o Caballo de Potencia en la Flecha; supongamos que tenemos un ventilador que indica que la potencia que debe recibir es 15 BHP, la potencia de motor que debemos acoplar a este ventilador debe ser:

$$\text{Potencia del motor} = \frac{\text{Potencia en la flecha (BHP)}}{0.75} = \frac{15 \text{ BHP}}{0.75} = 20 \text{ HP}$$

Así el motor trabajara dentro de los valores más altos de su eficiencia y en caso necesario tendrá 5 caballos de potencia reservada para circunstancias de mayor trabajo, pero a pesar de incrementar su factor de carga seguirá trabajando en el rango de mayor eficiencia.

No debe olvidarse satisfacer las necesidades de torqué del equipo acoplado, debe considerarse además de la potencia la velocidad, arrancador y protección que se requiere, entre otros aspectos.

XI. Reemplazo de Motores Sobredimensionados.

Cuando la potencia de un motor es mayor que la carga a la que opera se dice que trabaja a carga parcial, cuando esto ocurre se reduce la eficiencia del motor y aumentan los costos de operación, es común esta situación en las industrias debido a algunas de las siguientes razones:

- El personal no determina la carga requerida y selecciona un motor más grande que el necesario.
- Se consideran futuros incrementos en la producción.
- Al reemplazar un motor quemado por una unidad mayor debido a no tener el adecuado en existencia.
- Los requerimientos del proceso disminuyeron.
- Se adquiere una maquina para producir con cargas diversas, pero en la practica real se utiliza menor potencia.



XII. Sustitución de Motores Estándar por Motores de Alta Eficiencia.

En la Gráfica se presenta las curvas de eficiencia en función del factor de carga para 10 motores eléctricos de 1800 r.p.m., la mitad de eficiencia Estándar y la otra mitad de Alta Eficiencia. Las curvas superiores corresponden a motores de alta eficiencia de 10, 20, 30, 40 y 50 HP, las otras cinco curvas son de motores estándar de las mismas potencias.

La potencia eléctrica que demande un motor está totalmente relacionada con la eficiencia del mismo y con el factor de carga. De tal manera que al mejorar la eficiencia del motor la demanda eléctrica para la misma operación disminuye.

Observando el Gráfico 9 anterior resulta que es factible el sustituir motores estándar por motores de alta eficiencia bajo las siguientes condiciones.

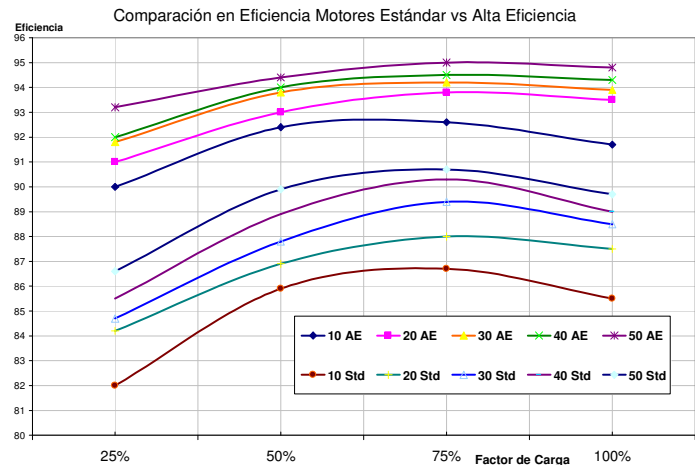
- ➔ Aplicación de Motores de Alta Eficiencia de Menor Tamaño. Cuando el motor estándar está trabajando con bajo factor de carga.
- ➔ Aplicación de Motores de Alta Eficiencia del Mismo Tamaño. Cuando el motor estándar está trabajando con un factor de carga entre 60% y 90%.
- ➔ Aplicación de Motores de Alta Eficiencia de Mayor Tamaño. Cuando el motor estándar está trabajando con un factor de carga mayor al 95%.

En todos los casos de sustitución deben tomarse muy en serio las condiciones de arranque y tipo de motor requerido. Por otro lado la sustitución debe estar avalada por un estudio minucioso de las condiciones de operación del motor, en el que se investigue sobre todos los parámetros eléctricos que alimentan al motor, sobre todo debe tenerse principal precaución en medir el factor de potencia por cada fase ya que una medición simple de corrientes puede llevar a resultados erróneos.

Los motores estándar que actualmente se fabrican poseen una buena eficiencia respecto de los motores con más de 20 años, pero éstos últimos son los que aún siguen operando en muchas industrias. Los motores de alta eficiencia son el resultado de estudios en materiales y formas de construcción que han dado lugar a su empleo con muy buenos resultados de operación y desempeñando su función ya de manera comprobada en numerosas aplicaciones.

Cuando un motor ya tiene una edad que supera los 10 años o ha tenido una o más reparaciones, es recomendable su sustitución, y más aún si se considera el empleo de motores de alta eficiencia.

Gráfico 9. Comparación entre motores estándar y motores de alta eficiencia



Fuente: Ing. Aguilar, Consultor



XIII. Metodología para Diagnosticar Energéticamente un Motor Eléctrico de Inducción.

La metodología es un secuencia de las siguientes actividades:

1. Recopilación de datos.
2. Realización de mediciones.
3. Análisis de carga por el método de deslizamiento.
4. Análisis energético con el factor de carga referido a la potencia de placa del motor.
5. Determinación de la acción de ahorro.
6. Evaluación económica de ahorro.

XIII.1 Recopilación de datos del motor:

Los datos fundamentales que habrá que recuperar del motor pueden encontrarse en la placa del motor o en catalogo técnico del fabricante de motores. Existen otras fuentes de consulta, como los software especializados del Fideicomiso para el Ahorro de Energía (FIDE) de México o el Motor Máster de Estados Unidos.

La recopilación de datos permitirá crear un expediente técnico sobre las cualidades que posee cada uno de los motores existentes en una instalación, entre los importantes se encuentran:

- Marca del motor
- Potencia del motor (Hp)
- Voltaje de placa
- Corriente de placa
- Velocidad de rotación a plena carga
- Velocidad de rotación de sincronismo
- Eficiencia nominal
- Torque requerido
- Tipo de motor; abierto, cerrado o a prueba de explosión
- Equipo acoplado: bomba, ventilador, compresor, banda transportadora, etc.

Puede auxiliarse de formatos de captura sistemática de información como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Fórmula para la Recopilación de datos

No.	NUMERO DE REFERENCIA	APLICACION	MARCA	DATOS DE PLACA				
				POTENCIA (hp)	VELOCIDAD (r.p.m.)	EFICIENCIA	VOLTAJE (Volts)	AMPERAJE (Ampers)

Fuente: Ing. Aguilar, Consultor



XIII.2 Realización de mediciones.

Se requiere realizar mediciones eléctricas con un analizador de redes eléctricas, que pueda ser programable en intervalos desde un segundo o menos, es muy importante que las mediciones cubran al menos tres ciclos representativos del trabajo del motor eléctrico. Las mediciones puntuales no sirven dado que no reflejan a ciencia cierta la forma de trabajo de un motor.

También es necesario contar con un tacómetro para medir las revoluciones por minuto, este equipo puede ser de contacto u óptico.

Los parámetros que deben medirse son:

- Corriente por fase: I1, I2, I3 y se calcula la corriente trifásica I1-2-3
- Voltaje entre fases: V1-2, V1-3, V2-3 y se calcula el voltaje trifásico V1-2-3
- Factor de potencia trifásico (F.P. trifásico)
- Mediciones de las RPM con tacómetro
- Aportación de corrientes armónicas

Un formato posible podría ser semejante a la siguiente Tabla 8.

Tabla 8. Fórmula para la Recopilación de mediciones

FECHA	HORA	Voltaje I (VOLTS)	Voltaje II (VOLTS)	Voltaje III (VOLTS)	Voltaje Prom (VOLTS)	Corriente I (AMPERES)	Corriente II (AMPERES)	Corriente III (AMPERES)	Corriente Prom (AMPERES)	Factor de Potencia I %	Factor de Potencia II %	Factor de Potencia III %	F.P. Prom %

Fuente: Ing. Alfredo Aguilar, Consultor

También es muy importante conocer el tiempo de operación del motor, si es de manera continua o tiene varios paros y arranques durante el día, tipo de transmisión, es decir, si está acoplado de manera directa o mediante una banda, etc. El tipo de arrancador (tensión plena o tensión reducida) y el tipo de control ya sea manual o automático.

Además será útil saber si el motor ya ha sido reparado y en caso de ser recurrente el problema en varios motores indagar las causas más frecuentes de falla.

XIII.3 Análisis de carga por el método de deslizamiento.

Como se dijo antes los motores de corriente alterna se revolucionan a una velocidad que es consecuencia de la frecuencia de alimentación y el número de polos magnéticos del motor, dicha velocidad llamada síncrona queda determinada por la relación:

$$n_s = \frac{120 \times f}{p}$$

donde :

f = Frecuencia de alimentación

p = Número de polos del devanado del estator.

Sin embargo los motores eléctricos tipo jaula de ardilla son asíncronos y no giran a la velocidad del campo magnético; sino que lo hacen a una velocidad muy cercana que normalmente está delimitada por



la de la placa del motor y la de sincronía. La velocidad a la que se desempeña un motor puede usarse para inferir el factor de carga de un motor y a su vez el factor de carga conduce a la determinación de la eficiencia del motor. Sin embargo cuando el motor ha sido reparado, o trabaja con voltaje o frecuencia distintas a las de placa. Por ello, el método de deslizamiento no produce valores certeros de eficiencia pero si aproximados a los verdaderos.

Determinación del Factor de Carga.

A partir de los datos de placa y mediciones se determina la potencia demandada en la línea con la siguiente ecuación:

$$\text{Potencia demandada (kW)} = \frac{\sqrt{3} \times V \times I \times F.P.}{1000}$$

Nota: La potencia demandada también puede obtenerse directamente del equipo de mediante medición.

Conociendo las revoluciones por minuto (RPM) de operación del motor, el deslizamiento se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\text{Deslizamiento real} = (\text{RPM}_{\text{síncronas}} - \text{RPM}_{\text{medidas}})$$

$$\text{Deslizamiento nominal} = (\text{RPM}_{\text{síncronas}} - \text{RPM}_{\text{placa}})$$

Ahora se puede estimar la carga del motor y la eficiencia a partir del deslizamiento:

$$\text{Factor de carga} = \frac{\text{Deslizamiento real}}{\text{Deslizamiento nominal}}$$

Este método para calcular el factor de carga del motor no es confiable con motores rebobinados o que no operen al voltaje de diseño, sin embargo proporciona una primera aproximación al factor de carga con que trabaja el motor.

La potencia de salida o al eje del motor se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\text{Potencia de salida o en la flecha} = \text{Factor de carga} \times \text{Potencia de placa}$$

Por último, la eficiencia se determina como:

$$\text{Eficiencia del motor} = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia demandada}}$$

$$\text{Eficiencia del motor} = \frac{0.746 \times \text{HP de salida}}{\text{kW demandados}}$$

Ejemplo, en un motor se realizaron mediciones de velocidad y potencia, los valores son:



RPM síncrona = 1,800
 RPM medida = 1,770
 RPM de placa = 1,750
 HP de placa = 25
 kW demandados = 13.1

$$\text{Deslizamiento} = 1,800 - 1,770 = 30$$

$$\text{Factor de carga} = \frac{30}{1800 - 1750} \times 100 = 60\%$$

$$\text{HP de salida} = 0.6 \times 25 = 15$$

$$\text{Eficiencia del motor} = \frac{0.746 \times 15}{13.1} \times 100 = 85.4\%$$

Ejercicio: Determine el factor de carga y eficiencia de un motor de 40 Hp, con una velocidad de placa de 3,540 RPM, el cuál registro una potencia trifásica de 26.5 kW. Se midió la velocidad con un tacómetro y fue de 3,554 RPM.

XIII.4. Análisis energético con el factor de carga referido a la potencia de placa del motor

Para la aplicación de este método es necesario contar con la información técnica del motor, la cual debe ser proporcionada por el fabricante del motor. La gran mayoría de marcas reconocidas de motores indican la relación que guarda el factor de carga de un motor con la eficiencia y factor de potencia del mismo, aunque la información se entrega en forma tabular para factores de carga del 25, 50, 75 y 100%, es posible hacer una interpretación gráfica que muestra la variación de la eficiencia con el factor de carga, en la Tabla 9 se muestra un ejemplo del comportamiento de un motor.

Tabla 9. Ejemplo de la relación entre Eficiencia, Factor de Carga y Factor de Potencia

F.C.	Eficiencia	F.P.
100%	89%	89%
75%	86%	85%
50%	79%	76%
25%	73%	60%

Fuente: Ing. Alfredo Aguilar, Consultor

El factor de carga se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Factor de Carga} = \frac{\text{Potencia Medida}}{\frac{\text{Potencia de Placa}}{\text{Eficiencia al 100\% de FC}}}$$

La eficiencia se determinará interpolando en la curva de comportamiento del motor con base al factor de carga obtenido en la curva del motor.



A menudo el factor de carga es diferente a los valores reportados por el fabricante (25, 50, 75, 100%), en estos casos habrá que hacer interpolación, en tal caso una buena aproximación se realiza con las siguientes ecuaciones:

$$F_{\text{actor Interpolación}} = \frac{FC1 - FC}{FC1 - FC2} \times 1 - X$$

FC con el 1 y el 2 son los valores de factor de carga que reporta el fabricante, FC es el factor de carga del motor en estudio.

Teniendo el factor de interpolación la eficiencia se aproxima con la expresión:

$$\text{Eficiencia} = \text{Eficiencia 1} - \text{Fac. Int.} \times (\text{Eficiencia 1} - \text{Eficiencia 2})$$

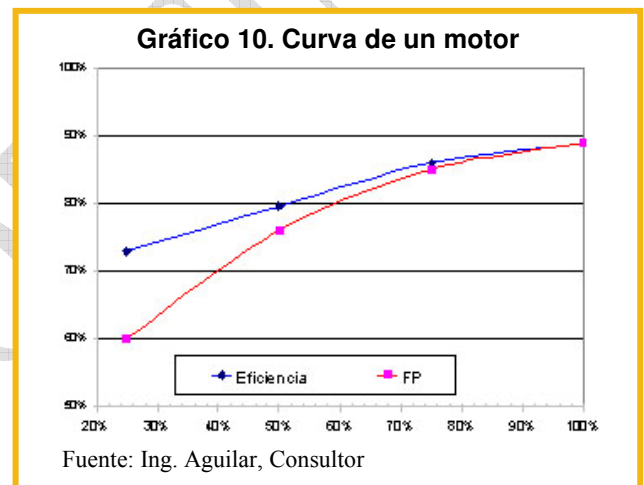
La eficiencia 1 es la correspondiente al FC1, la eficiencia 2 la correspondiente al FC2.

Ejemplo: Un motor de 30 Hp de 3,560 RPM a 440 Volts, tiene un comportamiento en su eficiencia y factor de potencia similar al de la Tabla 10. Por otro lado, se realizaron mediciones de potencia la cuál promedio un valor de 16.5 kW. ¿Cuál es su factor de carga y su eficiencia a ese factor de carga?. En el Gráfico 10 se grafican la eficiencia y el F.P.

Tabla 10. Relación Eficiencia y F.P.

F.C.	Eficiencia	F.P.
100%	89%	89%
75%	86%	85%
50%	79%	76%
25%	73%	60%

Fuente: Ing. Alfredo Aguilar, Consultor



Fuente: Ing. Aguilar, Consultor

$$\% \text{ de factor de carga} = \frac{16.5 / 0.746}{30 / 0.89} \times 100 = 65.6 \%$$

$$\text{Factor de interpolación} = \frac{75 - 65.6}{75 - 50} = 0.376$$

$$\text{Eficiencia} = (0.86 - 0.376 \times (0.86 - 0.79)) \times 100 = 83.37 \%$$

Ajustes de eficiencia.

Los motores eléctricos trabajando fuera de sus condiciones de diseño sufren cambios en su eficiencia, el valor de referencia es el voltaje de diseño. Sí el motor trabaja en un voltaje diferente o con voltaje desbalanceado debe ajustarse el valor de la eficiencia. Lo mismo habrá que hacer si el motor ya ha sido reparado.

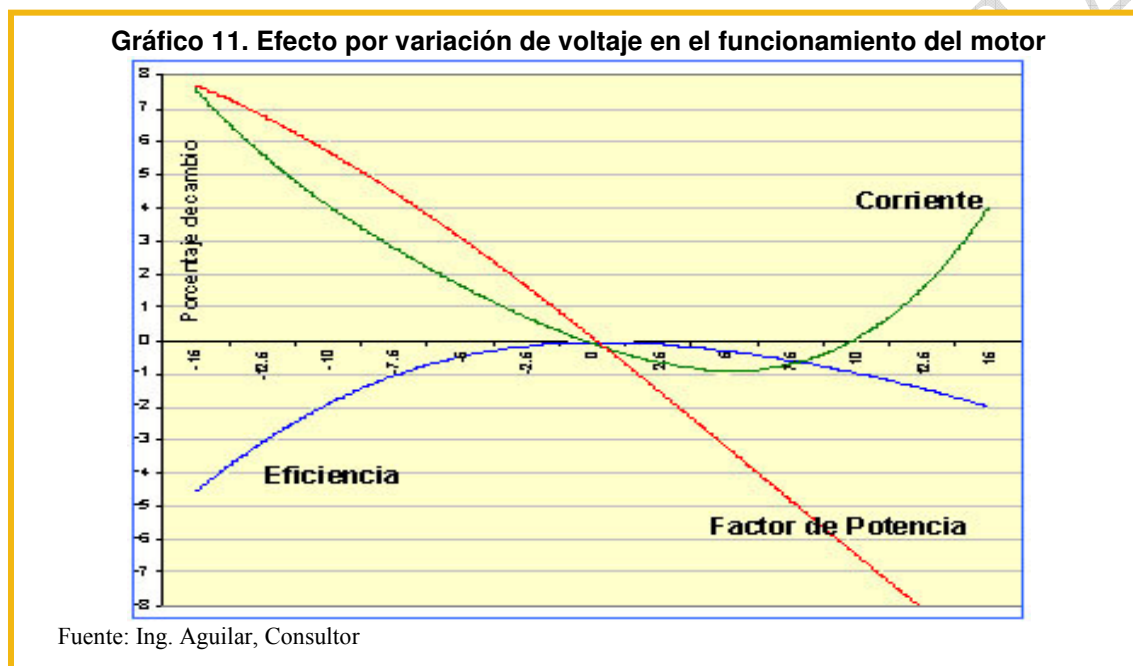


Variación porcentual de voltaje.

La variación porcentual es la relación entre el voltaje nominal con respecto al voltaje de operación, se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Variación Voltaje} = \left(\frac{\text{Voltaje promedio medido}}{\text{Voltaje de Placa}} - 1 \right) \times 100$$

Una vez obtenido este valor, con ayuda del Gráfico 11, se determina el porcentaje de cambio en la eficiencia, factor de potencia y corriente.



Ejemplo: El voltaje trifásico que es alimentado a un motor de 25 Hp es de 455 Volts, y el voltaje de placa de este motor es de 440 Volts. La eficiencia del motor es de 87.9% antes de aplicar el factor de corrección, se requiere determinar la eficiencia del motor ajustándola debido a la variación de voltaje.

$$\% \text{ Variación porcentual} = \left(\frac{455}{440} - 1 \right) \times 100 = 3.4\%$$

Factor de ajuste de eficiencia = - 0.19

$$\text{Eficiencia} = 87.9 \times (1 - 0.0019) = 87.73\%$$



Desbalanceo de voltaje.

El desbalanceo de voltaje está definido como la máxima desviación del voltaje de línea y el voltaje promedio en un sistema trifásico, dividido entre el voltaje promedio, se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Desbalanceo de Voltaje} = \frac{\text{Máxima Diferencia al Promedio}}{\text{Voltaje Promedio}} \times 100$$

$$\text{Máxima Diferencia al promedio} = \text{Volt}_{\text{máximo}} - \text{Volt}_{\text{promedio}}, \text{ ó, } \text{Volt}_{\text{promedio}} - \text{Volt}_{\text{mínimo}}$$

Si los voltajes están en desbalance la eficiencia del motor disminuirá a medida que aumente el desbalanceo de voltaje, tal como se muestra en el Gráfico 12:

Ejemplo. Se realizaron mediciones de voltaje entre fases y se obtuvieron los siguientes valores 462, 463 y 455 Volts, la eficiencia del motor antes de ajustes es de 87.91%. Con el desbalanceo actual determine la eficiencia real del motor.

El voltaje promedio = $(462 + 463 + 455) / 3 = 460$ Volts.

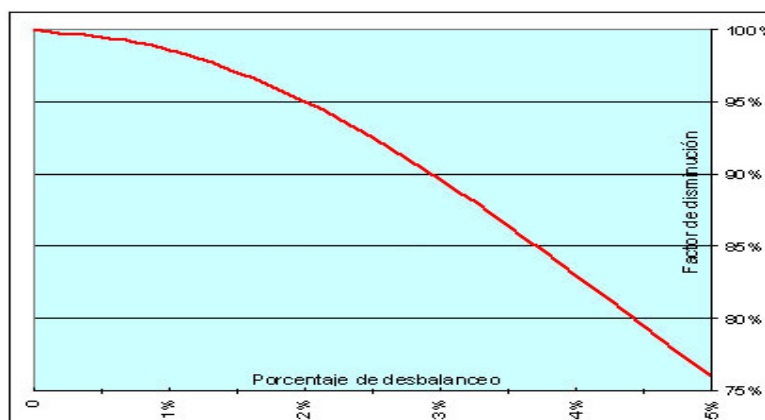
El máxima diferencia entre voltaje de línea y el promedio se determina de la siguiente manera:

$$\% \text{ Desbalanceo de Voltaje} = ((460 - 455) / 460) \times 100 = 1.1\%$$

De acuerdo a la curva se tiene un factor de ajuste de 0.98 por tanto la eficiencia real se determina como sigue:

$$\text{Eficiencia real} = 87.91 \times (0.98) = 86.15\%.$$

Gráfico 12. Efecto en el funcionamiento del motor por desbalanceo de voltaje.



Fuente: Ing. Aguilar, Consultor



XIII.5. Determinación de la acción de ahorro.

Si la eficiencia obtenida ha sido baja, digamos menor a los valores que reporta la siguiente tabla, puede analizarse la opción sustituir el motor actual por otro de alta eficiencia. Considere usted que la medida será más rentable para motores de operación intensiva, es decir aquellos que trabajan casi todo el día, en la medida que los motores trabajen menos tiempo se irá perdiendo rentabilidad, de tal manera que será vano hacer la evaluación de motores que trabajen menos de 5 horas al día. Sin embargo sí el motor aunque trabaje poco tiempo, presenta problemas en su funcionamiento será útil hacer la evaluación para indagar si ha sido bien seleccionado.

Tabla 11. Valores de eficiencia nominal a plena carga para motores verticales y horizontales, en por ciento

Potencia Nominal, kW	Potencia Nominal Cp	MOTORES CERRADOS				MOTORES ABIERTOS			
		2 Polos	4 Polos	6 Polos	8 Polos	2 Polos	4 Polos	6 Polos	8 Polos
0,746	1	75,5	82,5	80,0	74,0	75,5	82,5	80,0	74,0
1,119	1,5	82,5	84,0	85,5	77,0	82,5	84,0	84,0	75,5
1,492	2	84,0	84,0	86,5	82,5	84,0	84,0	85,5	85,5
2,238	3	85,5	87,5	87,5	84,0	84,0	86,5	86,5	86,5
3,730	5	87,5	87,5	87,5	85,5	85,5	87,5	87,5	87,5
5,595	7,5	88,5	89,5	89,5	85,5	87,5	88,5	88,5	88,5
7,460	10	89,5	89,5	89,5	88,5	88,5	89,5	90,2	89,5
11,19	15	90,2	91,0	90,2	88,5	89,5	91,0	90,2	89,5
14,92	20	90,2	91,0	90,2	89,5	90,2	91,0	91,0	90,2
18,65	25	91,0	92,4	91,7	89,5	91,0	91,7	91,7	90,2
22,38	30	91,0	92,4	91,7	91,0	91,0	92,4	92,4	91,0
29,84	40	91,7	93,0	93,0	91,0	91,7	93,0	93,0	91,0
37,30	50	92,4	93,0	93,0	91,7	92,4	93,0	93,0	91,7
44,76	60	93,0	93,6	93,6	91,7	93,0	93,6	93,6	92,4
55,95	75	93,0	94,1	93,6	93,0	93,0	94,1	93,6	93,6
74,60	100	93,6	94,5	94,1	93,0	93,0	94,1	94,1	93,6
93,25	125	94,5	94,5	94,1	93,6	93,6	94,5	94,1	93,6
111,9	150	94,5	95,0	95,0	93,6	93,6	95,0	94,5	93,6
149,2	200	95,0	95,0	95,0	94,1	94,5	95,0	94,5	93,6
186,5	250	95,4	95,0	95,0	94,5	94,5	95,4	95,4	94,5
223,8	300	95,4	95,4	95,0	---	95,0	95,4	95,4	---
261,1	350	95,4	95,4	95,0	---	95,0	95,4	95,4	---
298,4	400	95,4	95,4	---	---	95,4	95,4	---	---
335,7	450	95,4	95,4	---	---	95,8	95,8	---	---
373	500	95,4	95,8	---	---	95,8	95,8	---	---

Fuente: Ing. Alfredo Aguilar



Sustitución de un motor en operación por otro de alta eficiencia o de eficiencia Premium.

A partir de la caracterización del motor descrita se determinan los siguientes parámetros: potencia de salida del motor y potencia nominal del nuevo motor.

Potencia de salida o en la flecha.

Una vez obtenida la eficiencia y realizados todos los ajustes pertinentes, la potencia en la flecha se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Potencia en la flecha} = \text{Potencia demandada} \times \text{Eficiencia del motor}$$

Esta será la potencia que está entregando el motor al equipo accionado.

Ejemplo: De acuerdo con las mediciones en un motor de 40 HP se determinó una potencia promedio de 29 kW y una eficiencia de 89%, ¿cuál es la potencia en la flecha entregada por el equipo?.

$$\begin{aligned} \text{Potencia en la flecha} &= 29\text{kW} \times 0.89 = 25.81 \text{ kW} \\ &= 25.81 \text{ kW} / 0.746 \text{ (HP/kW)} = 34.6 \text{ HP} \end{aligned}$$

Determinación del nuevo motor en sustitución a uno ya existente.

La máxima eficiencia de un motor se obtiene entre 75 - 85% de carga, por tanto es necesario que el motor opere cercano a este rango de valores en carga.

Para determinar la potencia adecuada del motor, se divide la potencia en la flecha entregada por el motor actual entre un factor de carga de 75 - 85%, esto con la finalidad de obtener el máximo ahorro por la sustitución del motor.

$$\text{Potencia del nuevo motor (HP)} = \frac{\text{Potencia en la flecha (HP)}}{0.75 \text{ o } 0.85}$$

Con este valor se tiene escoger entre el valor de potencia inmediatamente superior o inferior, pero debe ser el que se encuentre trabajando a un porcentaje de carga mayor, además de acuerdo a las características del equipo accionado debe garantizarse una operación confiable, sobretodo a nivel del torque requerido por la aplicación.

Ejemplo: Se tiene un motor de 50 HP con una potencia en la flecha de 30 HP, cuál sería la potencia nominal de un motor de alta eficiencia para que sustituya al actual y trabaje a un 75% de carga.

$$\text{Potencia del nuevo motor (HP)} = \frac{30 \text{ (HP)}}{0.75} = 40 \text{ HP}$$

Determinación de la eficiencia del motor nuevo.

Una vez que se ha definido la potencia del motor a instalar, se utiliza nuevamente la curva del motor en este caso el de alta eficiencia y se tomará el valor de la eficiencia al factor de carga seleccionado, si es necesario se interpolará dependiendo del porcentaje de carga del motor elegido.



El factor de potencia se determina utilizando el mismo procedimiento que para la eficiencia.

Ajustar eficiencia.

En caso de que en la instalación eléctrica no se corrijan la desviación y el desbalanceo de voltaje se tendrá que hacer nuevamente el ajuste en la eficiencia de acuerdo a los procedimientos descritos anteriormente.

Determinación de los ahorros de energía.

Ya que se tiene la eficiencia y factor de potencia del nuevo motor se calcula la potencia demandada a la línea del nuevo motor mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Potencia demandada} = \frac{\text{Potencia de salida del motor actual}}{\text{Eficiencia del Motor Alta eficiencia}}$$

También se puede determinar de la siguiente manera:

$$\text{Potencia demandada} = \frac{\text{Potencia Motor Actual} \times \text{Eficiencia Actual}}{\text{Eficiencia Motor Alta Eficiencia}}$$

Este valor se resta de la potencia demandada del motor actual, es decir:

$$\text{Ahorro en demanda kW} = \text{kW}_{\text{demandados motor actual}} - \text{kW}_{\text{demandados nuevo motor}}$$

El ahorro en energía kWh se obtiene multiplicando la potencia ahorrada en kW por las horas de operación.

$$\text{Ahorro en energía kWh} = \text{kW}_{\text{ahorro en demanda}} \times \text{horas}_{\text{de operación del motor}}$$

En el caso de tarifas horarias.

$$\text{Ahorro kWh periodo 1} = \text{kW}_{\text{ahorro en demanda}} \times \text{horas}_{\text{de operación periodo 1}}$$

$$\text{Ahorro kWh periodo 2} = \text{kW}_{\text{ahorro en demanda}} \times \text{horas}_{\text{de operación periodo 2}}$$

$$\text{Ahorro kWh periodo 3} = \text{kW}_{\text{ahorro en demanda}} \times \text{horas}_{\text{de operación periodo 3}}$$

Ejemplo. El motor de la bomba de una torre de enfriamiento tiene los datos de placa (Tabla 12).

Tabla 12. Datos de Placa de un motor

Motor	Marca	Potencia (HP)	Polos	Velocidad (RPM)	Frecuencia	Volts (V)	Corriente (A)
RBC 18	IEM	100	4	1740	60 Hz	440	174

Fuente: Ing. Alfredo Aguilar, Consultor.

Las mediciones dieron una potencia promedio de 68.5 kW y la eficiencia del motor se determinó como 88%. Con estos datos la potencia de salida es:



$$\begin{aligned} \text{Potencia en la flecha} &= 68,5 \text{ kW} \times 0.88 = 60.28 \text{ kW} \\ &= 60.28 \text{ kW} / 0.746 \text{ (HP/kW)} = 80.8 \text{ HP} \end{aligned}$$

La potencia del motor apropiado sería:

$$\text{Potencia del nuevo motor (HP)} = \frac{80.8 \text{ HP}}{0.75} = 107.7 \text{ HP}$$

Con 107.7 HP como motor apropiado puede decirse que el motor actual está bien seleccionado pero no es de alta eficiencia. Realizando una búsqueda de motores de alta eficiencia o Premium, se encuentra uno que posee una relación factor de carga – eficiencia, como la indicada en la Tabla 13.

Tabla 13. Relación de Eficiencia

FC	Eficiencia
100%	95.4%
75%	95.9%
50%	94.8%
25%	94.3%

Fuente: Ing. Alfredo Aguilar, Consultor

El factor de carga del motor de alta eficiencia sería

$$FC = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia del motor}} = \frac{80.8 \text{ hp}}{100 \text{ hp}} = 0.808 \text{ o } 80.8\%$$

El factor de interpolación es:

$$F.\text{int.} = \frac{100 - 80.8}{100 - 75} = 0.768$$

$$\text{Eficiencia} = (0.954 - 0.768 \times (0.954 - 0.959)) \times 100 = 95.78 \%$$

Con esta eficiencia el nuevo motor solicitará una potencia calculada como sigue:

$$\text{Potencia Demandada} = \frac{\text{Potencia de salida del motor Actual}}{\text{Eficiencia del motor alta eficiencia}} = \frac{60.28 \text{ kW}}{0.9578} = 62.93$$

Por lo tanto hay un ahorro de potencia

$$\text{Ahorro en demanda eléctrica} = 68.5 \text{ kW} - 62.93 \text{ kW} = 5.57 \text{ kW}$$

Si el motor trabaja 24 horas al día en 22 días al mes en ahorro en consumo es:

$$\text{Ahorro en energía kWh} = \text{kW}_{\text{ahorro en demanda}} \times \text{horas}_{\text{de operación del motor}}$$

$$\text{Ahorro en energía} = 5.57 \text{ kW} \times 22 \times 24 \text{ horas} = 2941 \text{ kWh al mes}$$



XIII.6. Evaluación económica de ahorro.

Cálculo del ahorro económico anual por disminución en demanda

$$\text{Ahorro económico por demanda (kW)} = \text{Ahorro en kW} \times \text{Costo del kW}$$

Cálculo del ahorro económico anual por disminución en consumo

$$\text{Ahorro económico por consumo (kWh)} = \text{Ahorro en kWh} \times \text{Costo del kWh}$$

En el caso de tarifas horarias.

$$\text{Ahorro económico consumo 1 (kWh)} = \text{Ahorro en kWh 1} \times \text{Costo del kWh 1}$$

$$\text{Ahorro económico consumo 2 (kWh)} = \text{Ahorro en kWh 2} \times \text{Costo del kWh 2}$$

$$\text{Ahorro económico consumo 3 (kWh)} = \text{Ahorro en kWh 3} \times \text{Costo del kWh 3}$$

El ahorro económico por demanda como el de consumo se calculan mensualmente, por tanto los ahorros mensuales son:

$$\text{Ahorro mensual} = \text{ahorro económico demanda} + \text{ahorro económico consumo}$$

El ahorro anual será:

$$\text{Ahorro anual} = \text{ahorro económico mensual} \times \text{Meses en operación} \times \text{Factor inflación electricidad}$$

Cálculo Tiempo de Retorno de Inversión

La inversión habrá que desglosarla en todas las partes que sea necesario, los principales rubros suelen ser:

- Costo del Motor.
- Costo de protecciones, si acaso es necesario.
- Costo arrancador, si acaso es necesario
- Costo de materiales adicionales.
- Costo de la mano de obra.

El tiempo de retorno se calcula con la expresión

$$\text{Tiempo de Retorno en años} = \frac{\text{Inversión}}{\text{Ahorro Anuales}}$$



XIV. Fallas en Motores Eléctricos.

¿Por qué se averían los motores?

Cuando un motor llega a un taller especializado para su reparación, debe ser examinado con cuidado en busca de la posible causa de la falla. No es fácil localizar con precisión tal causa, pues muchas veces su origen se oculta bajo devanados quemados u otras averías engañosas. Por ejemplo los devanados pueden estar muy quemados, pero un examen detenido puede descubrir un cojinete dañado que ocasionó el rozamiento del motor contra el devanado del estator. Llevando el análisis más a fondo, ¿por qué falló el cojinete? Fue por desalineación, exceso de carga o sólo falta de lubricación.

Generalidades.

Es posible impedir desperfectos de los motores o por lo menos prolongar la duración de éstos, por medio de un mantenimiento preventivo adecuado. Una parte importante del proceso consiste en saber por qué se averían los motores. Se ha encontrado que los orígenes de los problemas en un motor suelen estar comprendidos en una de las siguientes categorías:

1. Condiciones ambientales adversas
2. Selección o aplicación incorrectas
3. Instalación inadecuada
4. Desperfectos mecánicos
5. Fallas eléctricas
6. Desequilibrio de voltaje
7. Falta mantenimiento
8. Una combinación de dos o más de los factores anteriores

XIV.1. Condiciones ambientales adversas

Temperatura del ambiente.

Los motores deben funcionar dentro de la variación límite de su temperatura indicada en su placa de identificación a fin de lograr una larga vida útil. Como ya se dijo en otra parte de este curso: por cada 10°C de aumento en la temperatura de operación del motor por encima de la nominal, la duración de la vida del aislamiento se reduce a la mitad.

El valor normal de la temperatura del ambiente o ambiental (TA) que se considera al diseñar un motor es de 40°C. Si se tiene por ejemplo, un motor con factor de servicio unitario y aislamiento clase 130, que debe trabajar a una temperatura ambiente de 50°C. Su elevación de temperatura (la cual normalmente podría ser de 80°C.) tendrá que reducirse a:

$$ET = 0.9 \times (130 - 50) = 72 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Además de mantener la temperatura ambiente correcta, hay que localizar y eliminar otras fuentes de aumento de temperatura, como la desalineación, sobrecarga, voltaje incorrecto y muchas otras condiciones ambientales perjudiciales que suelen consistir en la presencia de vapores corrosivos, sal suspendida en el aire, y suciedad, polvo y otros contaminantes en exceso. En lugares con tales condiciones es esencial contar con motores cuyas carcasas estén especialmente diseñadas.

La humedad es otra causa común de fallas de motores. Si se condensa en la superficie del aislamiento por cambios de temperatura o por contacto con agua, dicha superficie se volverá altamente conductora, se dañará y producirá la falla inmediata del motor. Además, es posible que el aislamiento absorba



humedad con el paso del tiempo, hasta que la resistencia dieléctrica del aislamiento se reduce tanto que ocurre la falla.

XIV.2. Altura sobre el nivel del mar

Además de considerar un valor máximo para la temperatura de ambiente a la que va a operar el motor, el diseñador también tiene presente la máxima altitud (o altura sobre el nivel del mar, ASM) a la que funcionará, y que se supone de 1.000m.

Puede utilizar la siguiente fórmula para calcular la elevación de temperatura corregida de un motor en función de la densidad del aire.

ET corregida = ET normal + ET del normal por Factor aire X

Donde

ET normal es la temperatura de operación del motor según especificación

Factor aire X es el efecto de la altura sobre la temperatura de operación

$$\text{Factor aire } X = \left(\frac{100}{\text{densidad (en\%)} \text{ del aire a la altura de lugar}} - 1 \right)$$

XIV.3. Selección o aplicación incorrecta del motor

Hay muchas formas en que la selección o aplicación de los motores pueden ser incorrectas. A veces el error es tan pequeño que la máquina dura largo tiempo. Es esencial seleccionar el tamaño y tipo requerido según la aplicación

La instalación también puede ser incorrecta, hay numerosos factores que deben considerarse. Por ejemplo, un ciclo severo de trabajo podría ocasionar falla prematura del motor. La marcha irregular a tirones, el frenado por contra marcha (inversión) y un prolongado tiempo de aceleración hacen que los motores trabajen a velocidad más baja que la normal. Debido a que los motores sometidos a este ciclo de servicio toman corrientes muy intensas en el arranque, éstas producen a veces, calentamiento excesivo. Además, debido a la baja velocidad, mucho empeora el problema del sobrecalentamiento.

La altitud de la instalación es otro factor importante que a menudo no se toma en cuenta. A grandes altitudes, el aire es menos denso y menos eficaz para el enfriamiento: esto permite que en casi todos los motores la temperatura aumente alrededor del 5% por cada 300m (1.000 pies) de altitud.

La selección de la carcasa también es importante; las hay disponibles y normalizadas para casi cualquier clase de situación.



XIV.4. Instalación inadecuada

Las deficiencias en el montaje del motor pueden ocasionar su falla. Si los pernos de montaje no son de la medida correcta o no están bien apretados, puede ocurrir una desalineación y vibraciones que ocasionarán daños en los cojinetes y el eje (flecha) y, en un momento dado la quemadura de los devanados. Las placas de la base de acero, los cimientos y el montaje deben tener suficiente resistencia para soportar los paros y arranques.

Acoplamiento, bandas, poleas y cualquiera otras conexiones entre el motor y la carga impulsada deben estar bien alineados para evitar la vibración excesiva, que es tan dañina para los motores.

XIV.5. Desperfectos mecánicos

Una carga excesiva puede dañar con rapidez un motor; éste quizá haya sido al principio del tamaño apropiado para la carga, pero una variación en ésta o en el mecanismo para la impulsión puede producir sobrecarga del motor.

Los cojinetes empezarán a fallar, los engranes pueden trabarse, o pueden presentarse otras causas de fricción o cargas extra. En este caso, el motor consumirá más corriente y se incrementará su temperatura. Si la corriente del motor excede del amperaje nominal a plena carga, aunque sea por un tiempo breve, el rápido sobre calentamiento reducirá la duración del motor. Si se tienen relevadores de sobrecarga del tamaño correcto, se dispararán en caso de una sobrecorriente muy intensa.

Las fallas de los cojinetes se encuentran entre las más comunes en cualquier motor. Se calcula que casi el 50% de las quemaduras de motores se deben a un cojinete dañado. Es necesario conocer a fondo los diversos motivos de las fallas de los cojinetes y los procedimientos correctos de mantenimiento para lograr un mayor aprovechamiento del motor.

La desalineación entre el motor y su carga en acoplamientos, engranajes, poleas y bandas es otra causa de falla mecánica. Debe practicarse el balanceo o equilibrado dinámico de todos los componentes para obtener una larga duración del motor, lo cual, además reducirá al mínimo la vibración y problemas asociados.

XIV.6. Fallas eléctricas

Si el voltaje de suministro es incorrecto o tiene variaciones notables, ocurrirá una avería prematura del motor. El bajo voltaje hace que la corriente normal se incremente. Si la reducción en la tensión aplicada es considerable, el exceso de corriente producirá sobre calentamiento del motor.

Un alto voltaje de alimentación para el motor reduce las pérdidas en los devanados, pero el flujo magnético más intenso ocasiona mayores pérdidas en el núcleo.

Un pequeño incremento en el voltaje de suministro podría reducir el consumo de corriente, sin embargo, un aumento del orden del 10% o más respecto al valor de la placa producirá saturación del hierro y una intensificación considerable en la corriente con el consecuente sobrecalentamiento perjudicial del motor.



XIV.7. Desbalance de voltaje

Los voltajes trifásicos desequilibrados o desbalanceados pueden ocasionar una grave alteración en la corriente, que puede producir un rápido sobre calentamiento del motor. Es necesario instalar una protección contra este problema, para lo cual suelen ser adecuados los relevadores de sobrecarga.

Ya se utilizan nuevos tipos de tales relevadores para proteger a un motor no sólo contra la caída de fases o monofásico, que en realidad es la forma extrema del desbalanceo de la tensión aplicada

XIV.8. Mantenimiento impropio

Casi siempre, el buen mantenimiento preventivo evita o cuando menos demora, una posible falla del motor. Los técnicos han encontrado en algunas instalaciones condiciones tales como polvo y suciedad en los motores, conductos de ventilación obstruidos, motores sobre calentados, corriente incorrecta en éstos, cojinetes ruidosos, humedad dentro y fuera de la maquina, debido todo ello a la falta de mantenimiento periódico.

En ocasiones, no todos los motores necesitan ni ameritan mantenimiento preventivo, en particular cuando el costo de este ultimo puede ser mayor que reparar el motor. Por otra parte cuando el motor se encuentra en una instalación crítica o es muy grande, costoso o difícil de sustituir, entonces si se justifica un buen programa de mantenimiento adecuado, y se ha descubierto que la producción no sufre interrupciones, los motores duran más y sus costos totales de operación son más bajos.

En otras ocasiones los motores son instalados y olvidados, sin recibir ningún tipo de mantenimiento, ni siquiera una leve limpieza de polvo, este descuido total de los motores habrá que evitarlo, para ello es bueno crear bitácoras que indiquen el estado de operación del motor, habrá que llenarlas periódicamente, en industrias con personal de mantenimiento dedicado podrán llenarse diario y en otras cada semana y aquellas que no tienen personal de mantenimiento por lo menos una vez al mes.

XIV.9. Fallas por operación con una sola fase

Un caso de quemadura de tres motores de 100 hp en una planta industrial pone de relieve el hecho de que la protección usual contra sobrecarga en los controladores trifásicos, aunque tenga el ajuste adecuado, no es una seguridad total contra las costosas quemaduras de esos motores cuando quedan alimentados accidentalmente por una sola fase, lo que constituye un desastre demasiado común.

En un sistema eléctrico moderno y con buen mantenimiento instalado en una planta industrial, un caso reciente de costosos daños a motores por la apertura de una fase en el circuito de alimentación puso de manifiesto una triste realidad de la industria eléctrica: el empleo creciente de motores en todos los tipos de sistemas va acompañado de un número también creciente de quemaduras de motores por monofásico.

Aunque el NEC, National Electrical Code (código eléctrico nacional de USA) exige la protección de los motores contra la sobrecarga, no menciona en absoluto la necesidad de proteger contra daños debidos a la operación monofásica accidental que puede producirse en motores trifásicos, cuando uno de los tres hilos de la fase del circuito derivado, o la línea alimentadora de tal circuito. Con tres relevadores de sobrecarga en el arrancador del motor éste se encuentra protegido, por que abren el arrancador en las condiciones de apertura de una fase, pero la realidad es que sólo constituyen una protección parcial y en condiciones muy específicas de carga y aplicación del motor.



XV. Rebobinado en Motores Eléctricos.

El rebobinado de motores en Centro América y otros países como México, sigue siendo de tipo artesanal, ya que son muy pocos los talleres que pueden efectuar trabajos profesionales, empleando comúnmente talleres donde al motor se le aplica calor sin control, golpes, torsiones y desarmados no correctos que reduce la eficiencia de un 4 al 6%, por esto es muy importante que el taller tenga el equipo adecuado, la metodología correcta y el personal capacitado.

El uso extendido de retirar las bobinas quemadas, por medio de un soplete, martillo y cuña, por lo general daña el aislamiento de las laminaciones del núcleo del Estator, en consecuencia un motor sin aislamiento entre laminaciones tendrá mayores pérdidas por corrientes eléctricas parasitas, llamadas de Eddy y trabajará más caliente, acortando su vida.

Cuando falla un motor se tienen tres alternativas: rebobinar el motor que ha fallado, comprar un motor nuevo estándar o uno de alta eficiencia para reemplazarlo.

Considerando que el motor quemado puede rebobinarse se tomará el costo de repararlo a su eficiencia original.

Algunos motores viejos de Coraza-U fueron construidos con ranuras demasiado grandes, esto hace posible que en ocasiones, se pueda realizar un rebobinado eficiente e incrementar ligeramente la eficiencia debido a la adición de una cantidad mayor de cobre para reducir la pérdida eléctrica que son el producto del valor de la corriente eléctrica por las resistencia eléctrica del cobre, I^2R .

XV.1 Procesos de rebobinado.

Un motor puede ser rebobinado con la misma cantidad de alambre en el devanado y misma configuración. Si un taller no tiene el tamaño correcto del alambre en existencia y utiliza uno de menor diámetro, las pérdidas I^2R en el estator se incrementarán.

Un decremento en el número de vueltas en el estator reduce la resistencia del embobinado y cambia el punto en el cual el motor alcanza la máxima eficiencia, incrementa el campo magnético, la corriente de arranque y el torque máximo.

Un cambio de 10 a 9 vueltas puede incrementar la corriente de arranque un 23%, lo cual puede causar problemas en la distribución eléctrica y en el sistema de protección del motor.

En un proceso de rebobinado común, el estator se calienta a alta temperatura para poder remover el aislante del devanado. Entonces el embobinado se retira y reemplaza.



Actualmente la mayoría de los talleres enfatizan más en la rapidez que en la calidad y se utilizan altas temperaturas para disminuir el tiempo de reparación y poner el motor rápidamente en operación.

En ocasiones se utiliza el soplete para ablandar el barniz y removerlo fácilmente. El resultado del uso de las altas temperaturas provoca un incremento en las pérdidas debido al cambio en las características eléctricas del núcleo del motor.

Para los motores estándar y de alta eficiencia, los talleres de rebobinado deben seguir las especificaciones de los fabricantes referente a las temperaturas para eliminar el aislamiento. Cuando se retire el viejo devanado, es importante que el núcleo esté abajo de los 180 °C.

Si el núcleo del estator se encuentra demasiado caliente, el aislante entre las láminas se puede dañar, incrementándose las pérdidas por corrientes de Eddy y disminuye la eficiencia de operación del motor.

Después de que se ha dañado el aislamiento no podrá ser recuperado ni recobrase la eficiencia sin restaurar el hierro. El motor también se volverá menos confiable.

La técnica para remover el aislante varía entre los distintos talleres de rebobinado y debe investigarse para decidir donde va a rebobinarse el motor.

En los talleres debe determinarse la causa que ocasionó la falla del motor. Aparte de verificar el procedimiento para desarmar el motor, es necesario asegurarse que el taller cumpla con los siguientes requisitos:

- 📖 Utilice métodos apropiados de limpieza,
- 📖 Instale aislamiento clase F o algún otro mejor,
- 📖 Use una fase de aislamiento entre todas las fases de empalme,
- 📖 Utilice lazos y métodos de bloqueo para asegurar una estabilidad mecánica,
- 📖 Utilice soldadura en vez de nudos,
- 📖 Use el alambre indicador apropiado,
- 📖 Aplique un tratamiento de barniz adecuado.

Debido a que las características de diseño (así como la geometría y configuración), los tipos de fallas, las prácticas de rebobinado y de las especificaciones de los materiales, es imposible identificar un costo de rebobinado “típico” para un motor de determinada capacidad, armazón y velocidad.

XV.2. Recomendaciones para el rebobinado de motores.

¿Cuándo se debe comprar un motor de alta eficiencia en vez de rebobinar el motor estándar que se quemó?

Esta decisión es complicada y depende de algunas variables como el costo del rebobinado, las pérdidas esperadas después de la reparación, costo del motor de alta eficiencia, capacidad y eficiencia del motor



así como su factor de carga, horas de operación, costo de la electricidad y el criterio utilizado para el tiempo de recuperación.

Algunas veces el rebobinar un motor será una de las mejores alternativas. Un rebobinado correcto se podría esperar si se tienen los datos del fabricante de cada motor y se le proporcionan al taller.

Los talleres de rebobinado no tienen todas las especificaciones de los fabricantes, lo que ellos hacen es desarmar el motor contando las vueltas del embobinado, anotando los nudos, midiendo el diámetro del alambre, etc., antes de remover el viejo embobinado.

Algunas veces un motor se quema frecuentemente debido a un mal rebobinado en el pasado. El mismo error se repetirá a menos que el reparador conozca el motor y diagnostique el problema.

De igual manera, se provocan fallas si un motor se somete a requerimientos de servicio inusuales; por ejemplo, encendidos frecuentes, un ambiente caliente, bajos voltajes, etc.

La mayoría de los talleres sabe como modificar las especificaciones originales para que el motor se ajuste a dichas condiciones.

Es recomendable evaluar la compra de un motor de alta eficiencia en vez de reparar el motor quemado, a continuación se proporciona algunos lineamientos para considerar la compra de un nuevo motor.

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

El ahorro de energía se determina de acuerdo al procedimiento descrito anteriormente, considerando los siguientes puntos:

- ➔ factor de carga,
- ➔ la eficiencia del motor,
- ➔ horas de operación
- ➔ costo de la energía

Se recomienda que el personal responsable de mantenimiento visite los talleres y conozca las instalaciones del taller, a su personal, conocimiento y capacitación, además de sus métodos de reparación a fin de poder apreciar la calidad de los trabajos, aún cuando el taller no se encuentre en la localidad de la industria, pues suele suceder que la persona encargada del equipo normalmente no conoce los talleres de reparación.



XVI. Aplicación de Convertidores de Frecuencia Variable.

XVI.1. Introducción.

El convertidor de frecuencia variable (CFV) es un control para el motor de inducción tipo jaula de ardilla; que es el motor más económico, sencillo y robusto además es el más utilizado en la industria e instalaciones en general.

Es el único control que suministra la potencia, permite la variación de velocidad en el motor sin ningún accesorio extra entre el motor y la carga, siendo además una excelente protección al mismo, por lo que ha llegado a ser uno de los controles más usados en los últimos años.

Una de las limitaciones del motor de inducción es la de tener velocidades fijas sin posibilidades de variación; siendo que los procesos y aplicaciones requieren diferentes velocidades y torques, sin embargo, se han desarrollado una infinidad de métodos para cambiar y variar las velocidades nominales, pero o bien la eficiencia es baja o el costo del equipo y mantenimiento es alto.

Uno de los métodos es el convertidor de frecuencia variable (CFV), la principal ventaja de este es la posibilidad de disminuir los consumos de energía eléctrica en algunos de los procesos que controla, dando como resultado considerables disminuciones en los costos de operación.

La alta confianza que ofrecen los CFV y la disminución de los precios en los mismos han permitido que cada día se instalen más equipos en todo el mundo; debido a esto y a otras ventajas, es necesario conocer y entender los principios básicos del funcionamiento y aplicaciones de los CFV.

XVI.2. Teoría de funcionamiento del convertidor de frecuencia.

El convertidor de frecuencia variable es conocido con diferentes nombres: variadores de velocidad, drivers, inversores, etc., pero el nombre correcto es el de convertidor de frecuencia variable pues incorpora el término de frecuencia que es lo correcto en este caso, debido a que los variadores de velocidad pueden ser equipos mecánicos por ejemplo, turbina de vapor, e inversores solo se refiere a una de las etapas del CFV.

La manera como un CFV convierte voltaje y frecuencia constante en voltaje y frecuencia variable se basa en un proceso de 2 pasos principales. Primero la corriente alterna es rectificadada y convertida a corriente continua, después se invierte y vuelve a entregarse corriente alterna pero con valores de frecuencia y voltaje variables.

El suministro de voltaje de un CFV puede realizarse a frecuencias que van desde 0 Hz hasta 120 o más Hz, por tanto la velocidad del motor es variable en la misma proporción que la variación de la frecuencia, así el motor puede girar lento o muy rápido de acuerdo a la frecuencia que le suministre el CFV.

Al mismo tiempo el voltaje es variable en la misma proporción que la variación de la frecuencia, para asegurar que la relación voltaje/frecuencia se mantenga con el mismo valor en todo el rango de velocidades mientras no pase de 60 Hz. Esto es debido a que el par que entrega el motor según diseño es determinado por esta relación y un motor de 460 Volts tendrá una relación Voltaje/Frecuencia de 7.6,

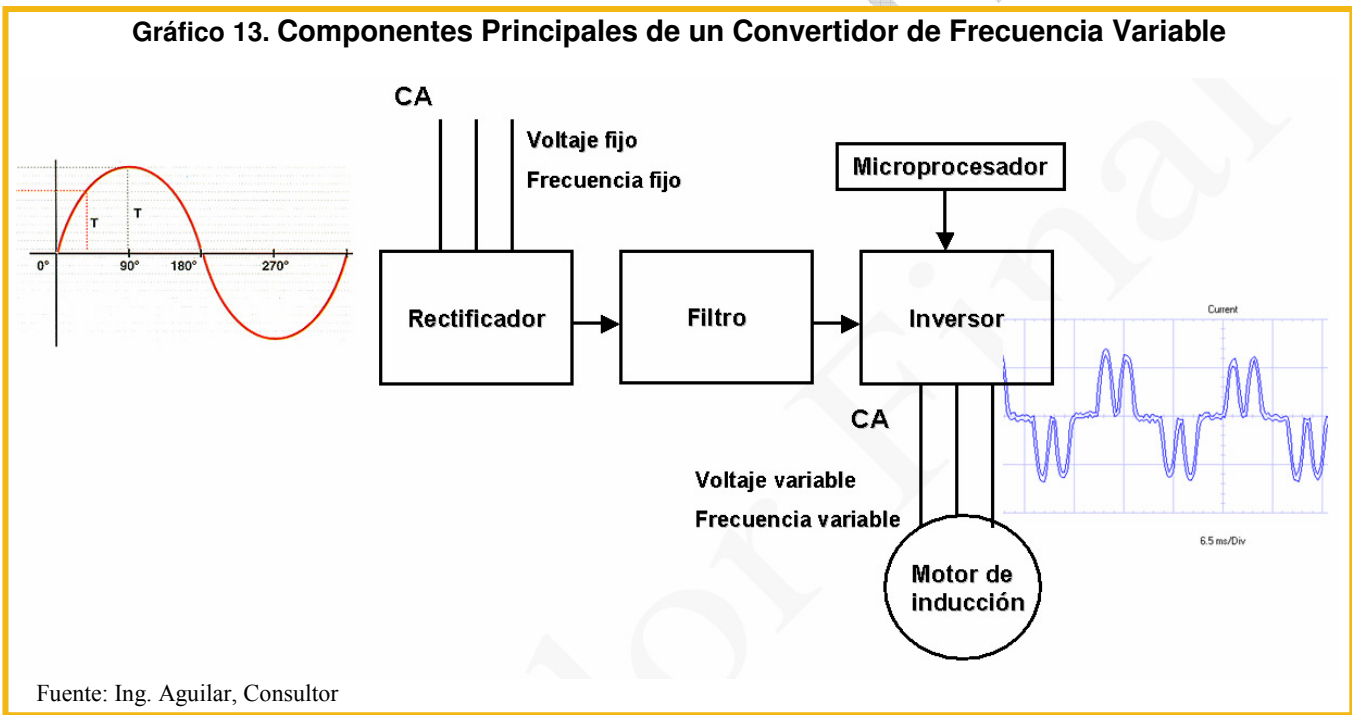


si este mismo motor lo manejamos a una frecuencia de 30 Hz, se tiene que suministrar un voltaje de 230 Volts para mantener la misma relación y el mismo par. Cualquier cambio en esta relación puede afectar el par, temperatura, velocidad o el ruido del mismo.

En resumen, para producir el par nominal en un motor a diferentes velocidades, es necesario modificar el voltaje suministrado conforme se modifica la frecuencia. El CFV mantiene esa relación de Volts/Hertz suministrada al motor automáticamente.

XVI.3. Componentes de un convertidor de frecuencia variable.

Rectificador de Corriente Directa. La parte rectificadora en el CFV convierte el voltaje C.A. en voltaje en C.D. para generar la frecuencia variable de salida necesaria de una fuente no alterna, dependiendo del tipo de convertidor este voltaje de C.D. puede ser variable o suavizado. La mayoría de los convertidores usados hoy son del tipo de modulación del ancho del pulso (PWM por sus siglas en inglés) que operan con un voltaje en C.D. suavizado. Los diodos de potencia son usados para producir el voltaje de C.D. suavizado y los rectificadores controladores de silicio (SCR's por sus siglas en inglés) son usados para el diseño de voltaje de C.D. variable. Es importante hacer notar que el voltaje del bus de C.D. es 1.41 veces mayor al voltaje de C.A., ya que toma el valor del pico de voltaje y no el voltaje R.M.S.



Inversor. En esta sección el voltaje en C.D. se invierte y vuelve a tomar la forma alterna por medio de rectificadores de silicio o transistores de potencia conectados directamente al bus de C.D. y controlados por microprocesadores, pero esta vez con una frecuencia y voltaje variable. Esta generación trifásica de C.A. se realiza a través de aperturas instantáneas de los transistores, aunque tiene ciclos positivos y negativos toma una forma cuadrática e interrumpida similar a la alimentación de entrada simulando la onda senoidal, según las necesidades de frecuencia pero manteniendo la misma relación Volts/Hertz del motor.

A esta tecnología se le denomina modulación del ancho de pulsos (Pulse Width Modulation PWM por sus siglas en inglés). Una tarjeta lógica de microprocesadores determina la frecuencia de conmutación de la



sección de inversión, permitiendo un rango amplio de frecuencias que van desde 0 hasta 400 Hz típicamente.

XVI.4. Aplicaciones de los convertidores de frecuencia.

La instalación de los variadores de velocidad electrónicos se ha venido realizando, para el mejoramiento en el control de los procesos y para fines de ahorro de energía.

Fig 6. Aplicaciones de Motores



Sistema de bobinadoras de papel



Sistema de Inyección de plástico



Sistema de impresión y transmisión



Sistema de mezclado.

Sin embargo, para esto es importante conocer los procesos y las necesidades de los mismos, esto implica conocer los tipos y clases de cargas que existen. Hay que recordar que la potencia requerida por la carga es variable y se incrementa conforme aumentamos la velocidad R.P.M.

XVI.5. Clasificación de las Cargas de los Motores

Como fue mencionado en la sección VIII los motores pueden estar sometidos a diferentes tipos de carga, los variadores de velocidad proporcionarían ahorro de energía solo cuando están sometidos a un régimen variable de trabajo. Como por ejemplo una grúa que puede elevar diferentes tipos de peso; una bomba centrífuga que maneja diversos caudales de agua; una industria laminadora que fabrica diferentes perfiles de acero.

Fig 7. Grúas de carga.....



Fuente: Ing. Alfredo Aguilar, Consultor



Fig 8. Relación Velocidad y potencia en equipos centrífugos

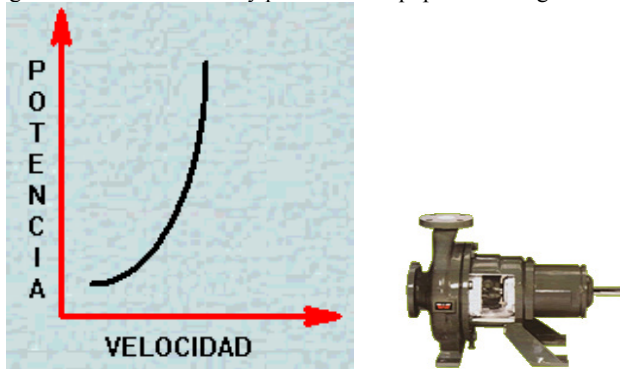


Fig 9. Industria metalmecánica



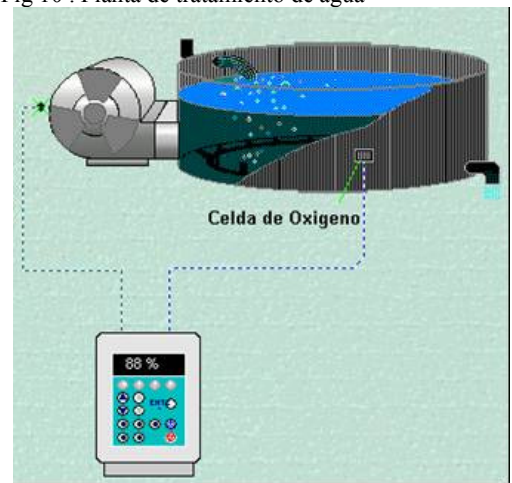
Cargas de Potencia Constante. Es el tipo de cargas, en el que no importa la velocidad a la que esté girando la carga, la potencia se mantiene en su valor máximo. Estas cargas se encuentran básicamente en máquinas herramientas, bobinadoras, dobladores, troquelados, etc., en estas cargas difícilmente se puede obtener ahorro de energía, debido a que el proceso exige el máximo de la potencia.

Como es de vital importancia conocer el tipo de aplicación donde se pretende instalar un convertidor, también es importante conocer algunos otros datos que ayudarán a hacer la elección correcta y evitar errores que pueden costar mucho dinero y tiempo. Es importante conocer los rangos de velocidades en los que va a trabajar la carga, y en que porcentaje está trabajando en caso de un convertidor ya establecido, cual es la potencia máxima y mínima que la carga demanda, que par se requiere al arranque, etc.

Estos datos se conocen a través de la información técnica que proporcionen los fabricantes de los equipos y a través de mediciones realizadas en campo en el caso de que el equipo ya este funcionando y se quiera determinar los porcentajes de carga a la que esté trabajando, y una vez conocida esta información dimensionar las características y capacidades de los equipos para el sistema trabaje con la mejor eficiencia posible.

Muchas de las aplicaciones de velocidad variable utilizan reductores después del motor, debido a requerimientos de velocidad baja y pares elevados, ya que la reducción se realiza por medios mecánicos como engranes, bandas, etc., es necesario tomar en cuenta las relaciones de reducción y considerar el motor y el reductor exacto para el caso específico.

Fig 10. Planta de tratamiento de agua



XVI. 6. Ahorro de Energía con Variadores de Velocidad Electrónicos

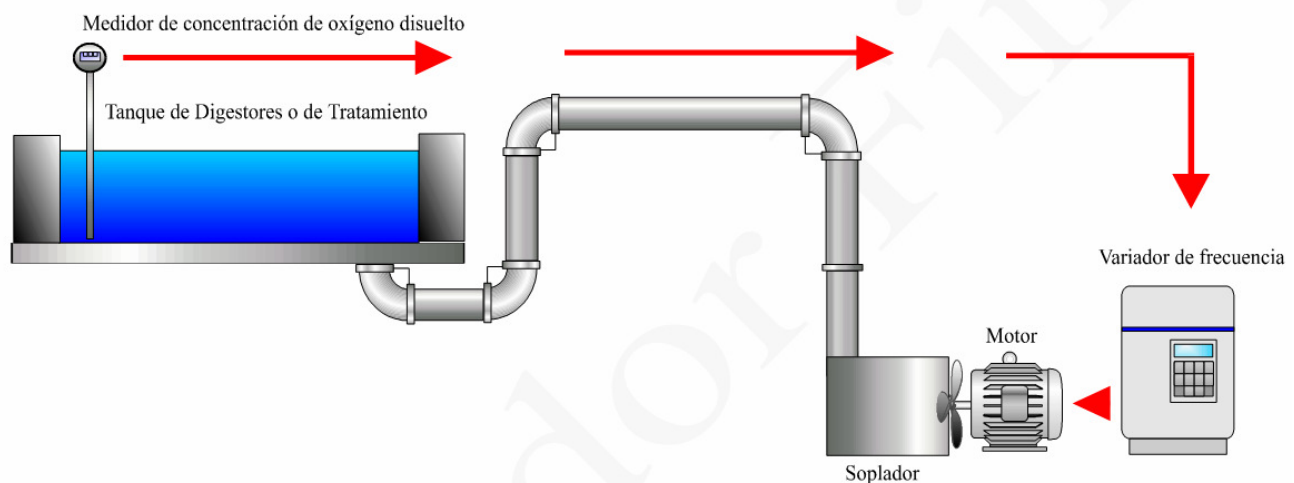
Ahorro de Energía en Cargas de Par Variable

Las cargas de par variable son las que proporcionan mayor ahorro de energía y el mayor número de estas aplicaciones son bombas y ventiladores centrífugos.

Por otra parte, casi la totalidad de las bombas centrífugas actuales es accionada por motores de inducción de jaula de ardilla de velocidad constante, sin embargo, ya puede ser modificada su velocidad mediante un convertidor de frecuencia que permita variar la capacidad de bombeo evitando las considerables pérdidas de fricción o energía debido principalmente a la estrangulación.

Se considera por los potenciales de ahorro de energía que el 70% de las aplicaciones de los accionamientos de velocidad variable son en este tipo de cargas.

Gráfico 14. Esquema de monitoreo de oxígeno para condicionar la velocidad del motor acoplado a un soplador de aire



Fuente: Ing. Aguilar, Consultor

La instalación de los convertidores de frecuencia se ha venido realizando, para el mejoramiento en el control de los procesos y para fines de ahorro de energía. Sin embargo, para esto es importante conocer los procesos y las necesidades de los mismos, esto implica conocer los tipos y clases de cargas que existen. Hay que recordar que la potencia requerida por la carga es variable y se incrementa conforme aumentamos la velocidad R.P.M.

Se logra mejor aprovechamiento de la tecnología ahorradora cuando se automatiza la operación, tal como ejemplifica el gráfico 14, que muestra un medidor de oxígeno que manda su valor a un variador de velocidad o frecuencia, el cual en su lógica programada en función del valor de la medición cambiara la velocidad del motor (RPM), haciendo que el soplador proporcione mayor o menor volumen de aire inyectando así cantidades variables de oxígeno.

Aplicación por Tipo de Cargas.

Cargas de par constante. La aplicación principal de los CFV en este tipo de carga, es la optimización del proceso y rara vez hay ahorros de energía, al menos de que se cumplan las siguientes condiciones: que la potencia demandada sea menor a la nominal y que esto sea a velocidades menores.

Cargas de par variable. En este tipo de cargas el CFV ofrece grandes oportunidades de ahorro de energía, debido a que los requerimientos de potencia disminuyen considerablemente conforme la velocidad es menor.

Ahorro de energía con convertidores de frecuencia variable.

Ahorro de energía en cargas de par variable.

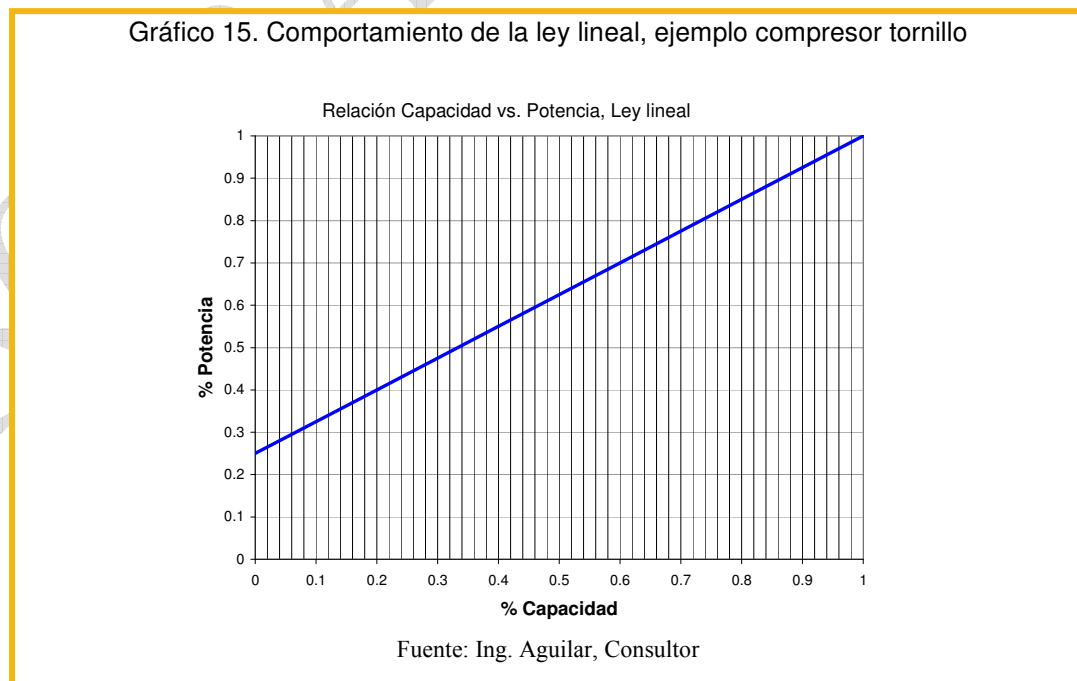
Las cargas de par variable son las que proporcionan mayor ahorro de energía y el mayor número de estas aplicaciones son bombas y ventiladores centrífugos.

Por otra parte, casi la totalidad de las bombas centrífugas actuales son accionadas por motores de inducción de jaula de ardilla de velocidad constante, sin embargo, ya puede ser modificada su velocidad mediante un convertidor de frecuencia que permita variar la capacidad de bombeo evitando las considerables pérdidas de fricción o energía debido principalmente a la estrangulación.

Se considera por los potenciales de ahorro de energía que el 70% de las aplicaciones de accionamiento de velocidad variable son en este tipo de cargas.

Aplicación de la ley lineal.

Algunos equipos como los de desplazamiento positivo ajustan en forma proporcional la demanda eléctrica a la velocidad del rotor. En estos casos el pronóstico de ahorros debe referirse a la curva de operación del equipo en estudio, por ejemplo el siguiente Gráfico 15 es válido para algunos compresores de aire tipo tornillo.



Aplicación de la ley cúbica.

En el caso de sistemas de impulsión de fluidos líquidos y gaseosos cuando las presiones no son muy altas, como es el caso de bombas y ventiladores respectivamente, existen ciertos parámetros y leyes físicas que rigen su funcionamiento; por los fines y el alcance del presente curso no se detallará la teoría de dónde salen las relaciones que a continuación presentamos como las “leyes de semejanza” para fluidos y sus equipos impulsores.

Las ecuaciones utilizadas en bombas, ventiladores y compresores centrífugos son las siguientes:

- $$\frac{D_1}{D_2} = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}$$
- $$\frac{D_1}{D_2} = \frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{H_1}{H_2}}$$
- $$\frac{D_1}{D_2} = \frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt[3]{\frac{Pot_1}{Pot_2}}$$

Estas ecuaciones pueden ser transpuestas en varias formas diferentes.

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2; \quad \frac{Pot_1}{Pot_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^3$$

Tres de las cuatro variables deben ser conocidas para poder determinar la cuarta.

Q = Flujo

N = Velocidad de la bomba, ventilador, compresor

Pot. = Potencia al freno, requerida por el equipo

D = Diámetro del impulsor

Ejemplo 1:

Determine el comportamiento de una bomba si sus condiciones de operación se reducen mediante un CFV al 75% de la velocidad nominal. Sus características iniciales son:

N = 3498 r.p.m.

Flujo = 0.72 m³ por minuto

H = 70 metros

P = 12 kW

Solución:

Se calcula la nueva velocidad:

$$N_2 = 3498 \times 0.75 = 2623 \text{ r.p.m.} \quad \text{tal que } \frac{N_1}{N_2} = 1.33$$

Por tanto, se obtienen los siguientes valores:

$$Q_2 = \frac{0.72}{1.333} = 0.54 \text{ m}^3 \text{ por minuto}$$



$$H_2 = \frac{70}{1.333^2} = 39.4 \text{ metros}$$

$$P_2 = \frac{12}{1.333^3} = 5.1 \text{ kW}$$

Ejemplo 2:

Una bomba tiene un flujo inicial de 48 m^3 por hora, sin embargo se recirculan 8 m^3 por hora, es decir, se requiere un flujo de 40 m^3 . Determinar el comportamiento de la bomba si trabaja únicamente con el flujo requerido.

$N = 1765 \text{ r.p.m.}$
Flujo = 48 m^3 por hora
 $H = 80 \text{ metros}$
 $P = 14 \text{ kW}$

Mediante las relaciones de afinidad se determinan los siguientes parámetros:

$$N_2 = \frac{40}{48} \times 1765 = 1470 \text{ RPM}$$

$$H_2 = \left(\frac{40}{48}\right)^2 \times 80 = 55.55 \text{ metros}$$

$$P_2 = \left(\frac{40}{48}\right)^3 \times 14 = 8.1 \text{ kW}$$

Ejemplo 3:

Una bomba con un impulsor inicial de 7 pulgadas (0.178 metros), se pretende cambiarlo por uno de 6 pulgadas (0.1524 metros). Las condiciones actuales de operación son las siguientes:

$N = 1755 \text{ r.p.m.}$ Flujo = 30 m^3 por hora
 $H = 60 \text{ metros}$ $P = 10 \text{ kW}$

Calcule todos los parámetros de operación con el nuevo impulsor.

$$Q_2 = Q_1 \times \frac{D_2}{D_1} = 30 \times \frac{0.1524}{0.178} = 25.7 \text{ m}^3 \text{ por hora}$$

$$H_2 = 60 \times \left(\frac{0.1524}{0.178}\right)^2 = 44 \text{ metros}$$

$$P_2 = 10 \times \left(\frac{0.1524}{0.178}\right)^3 = 6.3 \text{ kW}$$



En un sistema de manejo de fluidos no tendría ninguna ventaja instalar un Convertidor de Frecuencia Variable si las necesidades de flujo y presión no tuvieran variaciones, y siempre se requiriesen las máximas condiciones de trabajo, pero generalmente los sistemas de bombeo e inyección de aire se diseñan originalmente considerando el punto máximo de operación.

Todas las partes involucradas en el diseño como: tuberías, impulsoras, válvulas, tanques, motores, etc., también se encuentran diseñados para abastecer el volumen máximo requerido.

Considerando lo anterior, y que la mayoría de los sistemas tienen variaciones de demanda, se requiere de un sistema de control para regular continuamente el volumen del flujo, de acuerdo a las necesidades. Por lo general, el promedio del flujo bombeado puede ser una fracción de la capacidad máxima del sistema.

El control del flujo se puede regular de diferentes maneras, utilizando algunos de los siguientes métodos: recirculación, persianas, válvula de estrangulación, cajas de volumen variable, control de arranque/paro y convertidores de frecuencia.

Los métodos que implican poco ahorro de energía serían los de recirculación y arranque/paro, mientras que los métodos de control de obturador o estrangulamiento, que son los más usados pero su eficiencia es muy baja, la disminución en el consumo de energía es casi insignificante, ya que el motor continúa trabajando a su velocidad nominal tratando de sobreponerse a las contrapresiones innecesarias.

He aquí donde el CFV sustituye a cualquier tipo de control con grandes ventajas, y el único que reduce la velocidad del equipo sin necesidad de elementos mecánicos extras, el ahorro que se obtiene en la operación puede llegar al 60%.

Ahorro de energía en cargas de par constante.

Como se mencionó anteriormente, en una aplicación de par constante también es factible ahorrar energía eléctrica durante la operación, siempre y cuando se tengan variaciones en la carga y/o el equipo no se encuentre operando a su capacidad nominal.

Por ejemplo, una banda transportadora de material pesado. Las bandas siempre se dimensionan para transportar la máxima capacidad a la que fue diseñada, por tanto, el motor en determinadas ocasiones trabajará sobrado, ya que no siempre transporta la máxima carga, e inclusive sin carga debido a que no se alimenta de material regularmente, en estos casos si la velocidad baja el consumo de energía disminuirá conforme a lo solicitado por el sistema.

Una banda medio cargada consume sólo un poco menos de energía que una completamente llena. Una banda parcialmente cargada puede consumir el 80% de la energía necesaria para transportar la carga completa. Esta relación se empeora si la banda está vacía, ya que consume del 50 al 70% de la energía requerida para la carga nominal, de tal forma que aunque no esté realizando ningún trabajo ni suministrado material hay consumo de energía y un desperdicio del 50% de la energía instalada.

Con un CFV se logra ajustar la velocidad de la banda al material disponible en un momento dado. Regulando la velocidad sobre la base del factor de carga, de otra manera si la cantidad del material por transportar disminuye a la mitad, la velocidad de la banda disminuiría a la mitad, y si la cantidad de material disminuye de tal forma que la banda este vacía, la velocidad de la banda se reduce hasta en mínimo con el correspondiente ahorro de energía.



XVI.7. Beneficios y ventajas de la aplicación de convertidores.

Al utilizar los CFV como método de control se puede eliminar la inversión inicial, de cualquier tipo de arrancador y protección del motor, ya que estos hacen función de arranque y protección, mejorando la operación evitando los picos en el arranque el cual se realiza de forma suave, por consiguiente se pueden eliminar las presiones excesivas y golpes de ariete en tuberías.

También al utilizar este sistema en bombeo se requieren menos bombas, por ejemplo, para regular el flujo se utiliza bombas de diferentes capacidades, conectadas en paralelo, las cuales operan en turnos y se logra el control de paso a paso. Este control se puede lograr con una inversión menor, si se utiliza sólo una bomba de mayor capacidad con un CFV para obtener el control de flujo, y en algunos casos se puede eliminar el uso de tanques de presión, ya que con el CFV se logra un mejor control y proporciona una presión uniforme.

Otra de las ventajas es la disminución en los costos de mantenimiento, al emplear los CFV equipos acoplados se someten a un menor desgaste, se reduce la carga estática ya que el sistema no tiene que trabajar constantemente con alta presión en ductos y tuberías, como en el caso del uso de válvulas, y la carga dinámica es menor comparando con un control intermitente de arranque y paro. En algunos casos se puede llegar a duplicar la vida útil de los equipos.

En resumen, las ventajas al utilizar convertidores de frecuencia además del ahorro de energía son:

- Proporcionan un arranque lento y suave.
- Tiempos de aceleración y desaceleración ajustables.
- Amplio rango de velocidad.
- Mayor precisión en el control.
- Sistema de control con microprocesador programable.
- Factor de potencia casi unitario.
- Convertidor de diseño compacto y requiere poco espacio.
- Se aplica a motores de inducción robustos y sencillos.
- Se pueden controlar remotamente.
- Pueden enlazarse a una computadora o a sistemas de control.
- Automatización sencilla y rápida al incorporar transductores.

Además se obtienen los siguientes beneficios desde el punto de vista del proceso, y en consecuencia también se ahorra dinero:

- Reducción en el desgaste de los sistemas electromotrices.
- Incremento de la vida útil de los equipos asociados con los convertidores.
- Incremento de la productividad.
- Reducción de los costos de producción.



Sitios de Consulta

www.fide.org.mx

www.conae.gob.mx

www.cfe.gob.mx

www.energeticaintegral.com

www.baldordistribuidora.com

www.baldor.com

www.usmotors.com

www.weg.com.mx

www.eere.energy.gov

www.energysavingtrust.org.uk

www.eia.doe.gov

BORRADOR FINAL

