

EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MOTORES ELÉCTRICOS

1. TIPOS Y APLICACIONES

Los motores asíncronos (MA) son máquinas eléctricas, las cuales han tenido mayor aplicación en la industria y artefactos electrodomésticos. Estas máquinas son los principales convertidores de energía eléctrica en mecánica (actualmente los MA consumen casi la mitad de la energía eléctrica generada). Su uso es, principalmente, en calidad de mando eléctrico en la mayoría de los mecanismos, ello se justifica por la sencillez de su fabricación, su alta confiabilidad y un alto valor de eficiencia.

Hay 2 tipos de MA; los de rotor de jaula de ardilla y los de rotor de anillos rozantes.

2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

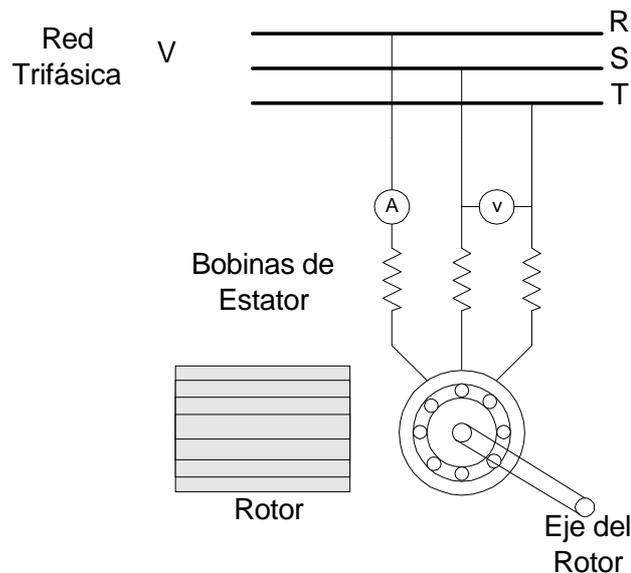


Fig.1.

En el MA se tiene 2 devanados, uno se coloca en el estator y el otro en el rotor. Entre el estator y rotor se tiene un entrehierro, cuya longitud se trata de, en lo posible, hacerlo pequeño ($s = 0.1 - 0.3 \text{ mm}$), con lo que se logra mejorar el acople magnético entre los devanados.

El devanado del estator puede ser monofásico o trifásico (en caso general polifásico). En lo sucesivo se analiza el motor trifásico, cuyas bobinas se colocan en las ranuras interiores del estator. Las fases del devanado del estator AX, BY, CZ se conectan en tipo estrella Y o triángulo Δ , cuyos bornes son conectados a la red.

El devanado del rotor también es trifásico (o polifásico) y se coloca en la superficie del cilindro. En el caso simple se une en corto circuito.

Cuando el devanado del estator es alimentado por una corriente trifásica, se induce un campo magnético giratorio, cuya velocidad (síncrona) es:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}$$

Si el rotor está en reposo o su velocidad $n < n_{\text{sinc}}$, entonces el campo magnético giratorio traspasa los conductores del devanado rotórico e inducen en ellos una f.e.m. En el gráfico siguiente se muestra por la regla de la mano derecha, la dirección de la f.e.m. inducida en los conductores del rotor cuando el flujo magnético gira en sentido contrario. La componente activa de la corriente I_{rot} se encuentra en fase con la f.e.m. inducida.

Sobre los conductores con corriente, empleados en el campo magnético, actúan fuerzas electromagnéticas cuya dirección se determina por la regla de la mano izquierda; estas fuerzas crean un M_{elmagn} que arrastra al rotor tras el campo magnético. Si este M_{elmagn} es lo suficientemente grande entonces el rotor va a girar y su velocidad n_2 va a corresponder a la igualdad.

$$M_{\text{elmagn est}} = M_{\text{freno rot.}}$$

Este es el funcionamiento de la máquina en régimen de motor y es evidente en este caso.

$$0 \leq n_2 < n_1$$

A la diferencia de velocidades entre el campo magnético y el rotor se le llama deslizamiento y se representa por el símbolo s .

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

De donde se deduce que en el régimen de motor

$$0 < s \leq 1$$

En generador : $s > 0$

En frenado electromagnético $s > 1$

La principal característica de las MA es la presencia del deslizamiento s , ósea la desigualdad de velocidades entre el campo del estator y la velocidad del rotor $n_2 \neq n_1$.

3. DIAGRAMA ENERGÉTICO DEL MOTOR ELÉCTRICO

Cuando el motor está en funcionamiento, el estator se alimenta de la red y absorbe una potencia:

$$P_1 = m_1 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\phi_1$$

Parte de la P_1 se consume (disipa) en la resistencia R del devanado del estator ocasionando una pérdida eléctrica ΔP_{el1} , así como una pérdida magnética en el campo del estator ΔP_{mag} , deduciendo dichas componentes, al rotor se le aplica una potencia electromagnética, que se expresa mediante la siguiente ecuación de balance energético:

$$P_{el\text{mag}} = P_1 - \Delta P_{el1} - \Delta P_{mag}$$

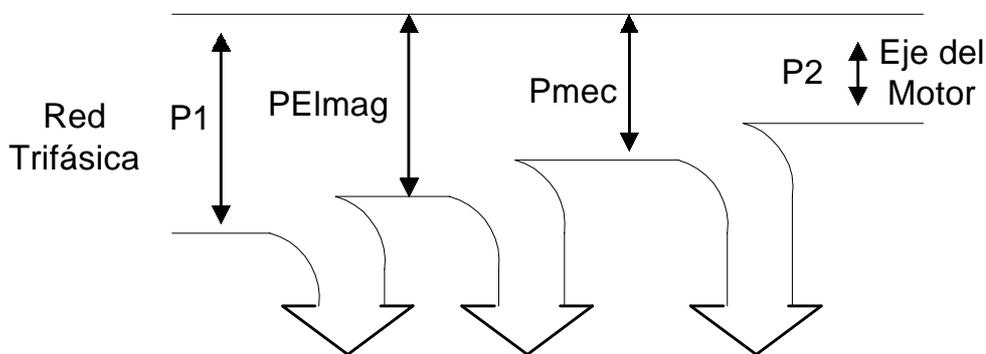
Parte de esta potencia se disipa en cubrir las pérdidas eléctricas del rotor ΔP_{el2} en su devanado, la potencia resultante es aquella que va a ser convertida en potencia mecánica, expresado por:

$$P_{mec} = P_{el\text{mag}} - \Delta P_{el2}$$

En las máquinas de anillos rozantes, además se tienen pérdidas en las escobillas de contacto, las cuales se añades a la pérdida ΔP_{el2} .

La potencia mecánica obtenida en el árbol del eje del rotor, se obtiene luego de vencer su inercia y otras pérdidas adicionales, obteniéndose una potencia P_2 :

$$P_2 = P_{mec} - \Delta P_{fric} - \Delta P_{adic}$$



Pérdidas:

$$\Delta P_{el\text{ est}} + \Delta P_{adic}$$

$$\Delta P_{el\text{ rot}}$$

$$\Delta P_{fric} + \Delta P_{adic}$$

4. RELACIÓN ENTRE EFICIENCIA (η) Y DESLIZAMIENTO (s) EN MOTORES

Para definir la relación entre la Eficiencia η y el Deslizamiento s en los motores, se analiza la eficiencia mediante la relación:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{P_{\text{elmag}}}{P_1} \right) \cdot \left(\frac{P_2}{P_{\text{elmag}}} \right) = \eta_1 \eta_2$$

donde η_1 y η_2 - eficiencias del estator y del rotor

Teniendo en cuenta:

$$\eta_2 = \frac{P_2}{P_{\text{elmag}}} = \frac{P_{\text{elmag}} - \Delta P_{\text{el2}} - \Delta P_{\text{fric}} - \Delta P_{\text{adic}}}{P_{\text{elmag}}}$$

entonces es válida la siguiente relación:

$$\eta_2 < \frac{P_{\text{elmag}} - \Delta P_{\text{el2}}}{P_{\text{elmag}}} < \frac{1 - \Delta P_{\text{el2}}}{P_{\text{elmag}}} < (1 - s)$$

Por lo tanto:

$$\eta < \eta_2 < (1 - s)$$

Del análisis realizado se puede concluir con lo siguiente:

Para que un motor funcione en su régimen nominal con una alta eficiencia, es necesario que en este régimen se tenga un deslizamiento s de pequeña magnitud. Por lo general $s_{\text{nom}} = 0.01 - 0.06$, para ello el devanado del rotor lo diseñan de tal forma que tenga una resistencia óhmica pequeña.

5. DATOS NOMINALES DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS

Potencia, kW ó HP
Tensión de servicio, kV ó V
Frecuencia, Hz
Velocidad nominal, r.p.m.
Corriente nominal, Amp.
Corriente de arranque. Amp.
Factor de potencia, $\cos \phi$
Eficiencia, η %

6. SISTEMA DE FUERZA

En una planta industrial, se denomina sistema de fuerza al conjunto de todos los equipos e instalaciones que tiene por objeto realizar un trabajo mecánico y/o de producción. El equipo eléctrico que puede realizar trabajo mecánico es el motor eléctrico, y por lo tanto son estos equipos los principales dentro del proceso de producción. El sistema de fuerza a su vez, en una planta es alimentado con energía desde una subestación de distribución del servicio público de electricidad. De lo sucintamente descrito se observan la importancia de las máquinas eléctricas en la industria.

Cabe señalar que los sistemas de refrigeración y calefacción también forman parte del sistema de fuerza en una instalación eléctrica de tipo industrial.

En el caso de los sistemas de uso residencial - comercial, el sistema de fuerza está conformado por los circuitos principales de iluminación, aire acondicionado y sistemas auxiliares (bombas, ascensores, etc.)

Sólo con esta condición en el rotor se va a inducir la f.e.m. y va a surgir un momento M_{elmag} funcionando.

El devanado rotor se intercepta con el flujo Φ , originando un deslizamiento $n_s = n_1 - n_2$

la fuerza de la f.e.m.

$$F_2 = F_1 S$$

6.1 VARIADORES DE VELOCIDAD

Los controladores de frecuencia variable son dispositivos complejos y hasta hace poco eran costosos. Sin embargo, trabajan con motores estándar lo cual permiten su fácil adición a unidades motrices existentes. Varios tipos de ventiladores (enfriadores de aire, torres de enfriamiento, ventilación y aire acondicionado, etc.) operan a velocidad variable mediante sistemas de variación de velocidad.

Los sistemas de variación de velocidad alteran la velocidad del motor cambiando el voltaje y la frecuencia de la electricidad suministrada al motor en base a los requerimientos del sistema. Esto se logra convirtiendo corriente alterna en continua, y luego de múltiples mecanismos de cambio, invirtiendo la corriente continua a corriente alterna sintética con voltaje y frecuencia controlados. Si este proceso es realizado en forma apropiada, la velocidad del motor puede ser controlada en un

rango amplio (desde cero RPM hasta el doble de la velocidad nominal) con las características de torque apropiadas para la aplicación.

Para mantener un factor de potencia apropiado y reducir calentamiento excesivo del motor, debe mantenerse el ratio de voltaje/frecuencia original. Esta es la función principal del variador de velocidad. Los cuatro componentes principales que hacen posible la operación de los variadores de velocidad son: convertidor, inversor, circuito de corriente continua (que sirve de enlace entre ambos), y la unidad de control, tal como se muestra en la **Fig. 1**.

El convertidor contiene un rectificador y varios circuitos que convierten la frecuencia fija de corriente alterna en continua. El inversor convierte la corriente continua en corriente alterna de voltaje y frecuencia regulables (ambos deben ser regulables para poder mantener ratios de voltaje/frecuencia constante). Los circuitos de corriente continua filtran la corriente y la conducen al inversor. La unidad de control regula el voltaje y la frecuencia de salida en base a la señal proveniente del proceso (ej. sensor de presión). Los tipos principales de inversor son inversores de voltaje, inversores de corriente e inversores de modulación de pulsos.

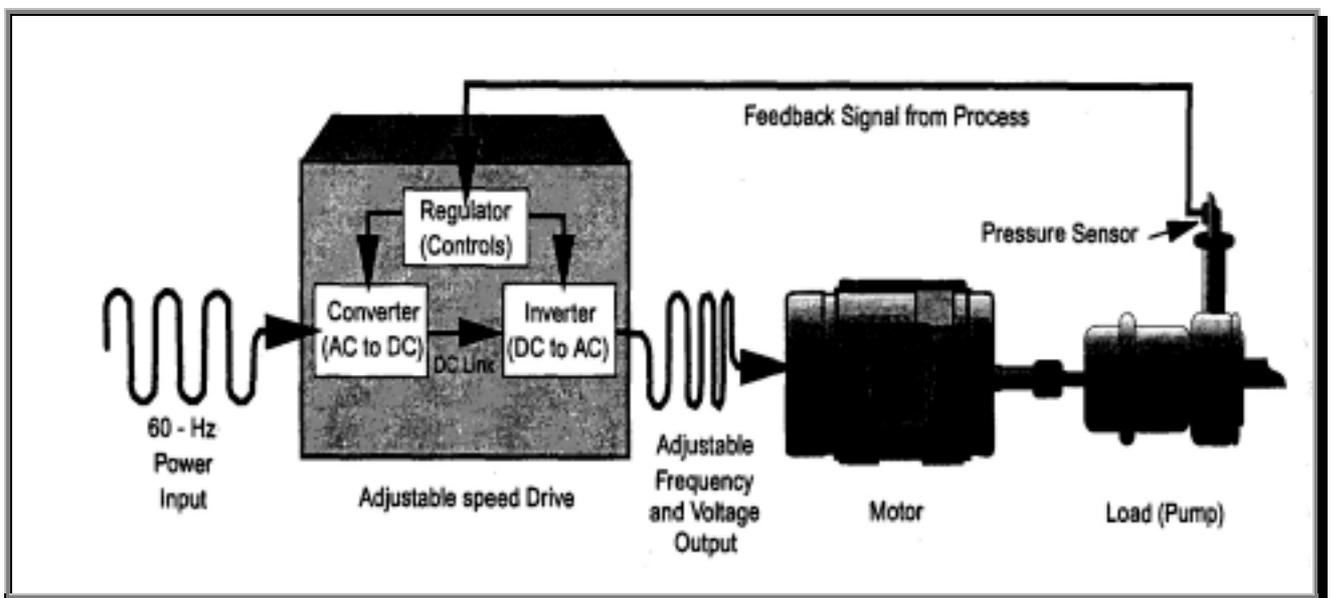
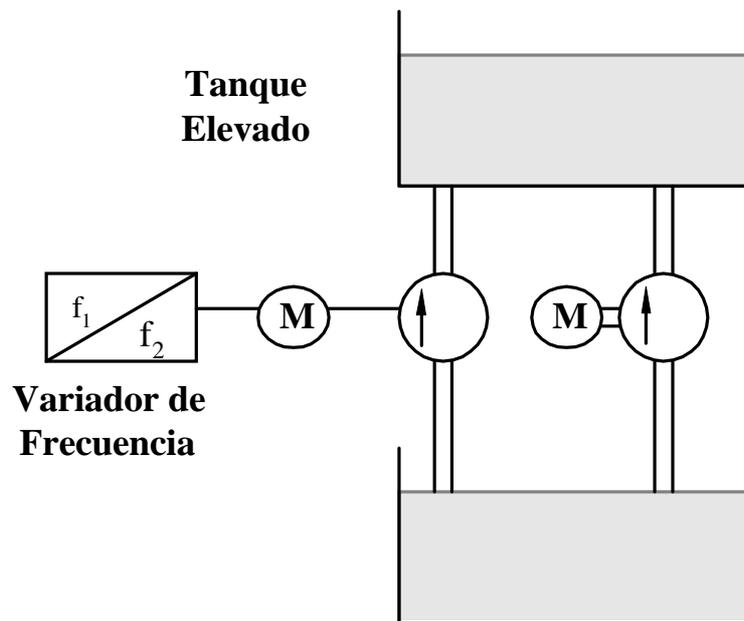


FIG.1

APLICACIONES

Los sistemas de variación de velocidad ofrecen varios beneficios en términos de ahorro de energía, el cual es logrado mediante la eliminación de pérdidas debido a estrangulamiento, rendimiento y fricción. La aplicación de un sistema de variación de velocidad depende fundamentalmente de la carga y requiere de un sólido conocimiento de las características de la carga para su aplicación exitosa. El tipo de carga (torque constante, torque variable, potencia constante) debe ser determinado así como la fracción de tiempo que el sistema opera (o podría operar) por debajo de la velocidad nominal.

6.2 REDUCCIÓN DE NÚMERO DE BOMBAS



- Variación de caudal con dos motores de potencias diferentes
- Equipar el más grande con variador
- Parar un sistema
- Ahorro de un consumo de un motor

7. GUÍA PRÁCTICA DE CÁLCULO: MOTORES ELÉCTRICOS

(Fuente: OLADE – ICAITI)

7.1 POTENCIAS PARA MÁQUINAS

A. POTENCIA PARA EL MOTOR QUE ACCIONA UNA BOMBA

$$P = Q \cdot d \cdot h / \eta$$

P- potencia en kW
Q- caudal en m³/S
d- peso específico en N/dm³
h- altura de la elevación en m
η- rendimiento mecánico

B. POTENCIA PARA ELEVACIÓN DE AGUA

$$P = Q \cdot h / 75\eta$$

P- potencia en CV
Q- caudal en m³/s
h- altura de la elevación en m
η - rendimiento mecánico

C. POTENCIAS PARA MÁQUINAS DIVERSAS (Orientativas)

a) Máquinas herramientas para metales

- Torno revolver 3 a 20
- Torno paralelo 3 a 45
- Torno automático 1 a 15
- Fresadora 1 a 25
- Rectificadora 1 a 30
- Martillos pilón 10 a 100
- Cizallas 1 a 40
- Máquinas de cortar y roscar 1 a 20
- Taladradoras verticales 1 a 10
- Taladradoras radiales 10 a 40
- Mandrinadoras 10 a 30

b) Industria de la construcción

- Hormigoneras 3 a 6
- Muela, perforadoras, sierras 1 a 3
- Cintas transportadoras 2 a 5

c) Máquinas para trabajar madera

- Sierra de cinta 0.5 a 6
 - Sierra circular2 a 6
 - Taladradoras2 a 4
 - Cepilladoras20.75
 - Tornos1 a 15

d) Máquinas agrícolas

- Empacadoras de paja 2 a 5
- Trilladoras7 a 15
- Centrifugadoras de leche0.5 a 3
- Elevadores de granos1 a 3
- Elevadores de sacos1 a 3
- Limpiadores de grano1 a 3

D. POTENCIA DE UN MOTOR PARA MECANISMOS DE ELEVACIÓN

$$P = F \cdot v / 1,000 \cdot \eta$$

$$F = m \cdot g$$

Potencia - potencia mínima del motor en kW

F - fuerza resistente a la marcha en N

v - velocidad en m/s

η - rendimiento mecánico

g - aceleración (9.81)

E. POTENCIA DE UN MOTOR PARA UN MECANISMO GIRATORIO

$$P = M \cdot n / 9,550 \cdot \eta$$

P- Potencia mínima del motor en kW

M- par de giro en Nm

n - revoluciones por min^{-1}

F. POTENCIA DE UN MOTOR PARA EL ACCIONAMIENTO DE GRÚAS CON ACCIONAMIENTO UNILATERAL DEL CARRO

$$P = P1 \cdot mg + 2 (mc + mcar) / \Sigma m$$

P- potencia en kW

P1 - potencia mínima necesaria en kW

mg - masa de la grúa en Kg

mc - masa del carro en Kg

mcar - masa de la carga en Kg

G. POTENCIA DE UN MOTOR PARA MECÁNICO DE TRASLACIÓN

$$P = F \cdot w \cdot v/2\pi \cdot 9,550 \cdot \eta$$

P- potencia en kW

F- peso total en N

w- Resistencia de traslación 0.007 cojinetes de rodillo 0.020 de fricción

v- velocidad de traslación en $m \times \text{min}^{-1}$

η - rendimiento mecánico

H. POTENCIA DE UN MOTOR PARA UN ASCENSOR

$$P=1/2 \cdot f \cdot v/1,000 \cdot \eta$$

P – potencia en kW

F- fuerza en N

v- velocidad en m/s

η - rendimiento mecánico

En ascensores y montacargas, el peso de la cabina y la mitad de la carga útil queda compensado por el contrapeso

I. POTENCIA DE UN MOTOR PARA MECANISMOS DE ELEVACIÓN

$$P= F \cdot v/1,000 \cdot \eta$$

Esta fórmula es igual a la anterior, suprimiendo 1/2 por los conceptos de peso de la cabina y la mitad de la carga útil.

J. POTENCIA ABSORBIDA POR UN VENTILADOR

$$P= Q \cdot P \cdot 9.81/1,000 \cdot \eta$$

P - potencia en kW

Q - caudal en m^3 /s

P - presión en mm c.d.a. (columna de agua)

η - rendimiento mecánico

K. POTENCIAS PARA MOTORES

1) Potencia necesaria en una máquina	
$P = M \cdot n / 9,550 \cdot \eta_m$ $P = FD \cdot v / 1,000 \eta_m$	P - potencia en kW M - par de giro de la máquina en Nm N - número de revoluciones por minuto η_m - rendimiento de la máquina F - fuerza (peso, fricción) en N V - velocidad en m/s
2) Potencia absorbida por una motor trifásico	
$P1 = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\phi$ $P2 = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\phi / 735$ $P3 = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\phi / 1,000$	P1 - en W P2 - en CV P3 - en kW V - tensión nominal en V I - intensidad nominal en A $\cos\phi$ - factor de potencia
3) Potencia desarrollada por un motor trifásico	
$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\phi \cdot \eta / 1,000$	P- en kW η - rendimiento del motor a la potencia nominal
4) Potencia absorbida por un motor de corriente continua	
$P = V \cdot I$ $P1 = V \cdot I / 1,000$	P - en W V - tensión de inducido en V I - intensidad nominal en A P1 - en kW
5) Potencia absorbida por un motor monofásico de corriente alterna	
$P = V \cdot I \cdot \cos\phi$ $P1 = V \cdot I \cdot \cos\phi / 1,000$	P - en W P1 - en kW
6) Equivalencias	
ICV = 736 W (735,4987 W) IHP = 746 W (745,6999 W), caballo de vapor Inglés 1kW = 1,36 CV 1 MW = 10 ⁶ W = 1,000 kW	

7.2. CARACTERÍSTICAS QUE DEFINEN UN MOTOR

1. Tensión (V)
Monofásica, trifásica, corriente continua, con diferentes valores (220V, 380V, 500V)
2. Potencia (kW)
En función a la potencia y tensión vendrá dada la intensidad (A)
3. Frecuencia (Hz)
En Europa, 50 Hz. En América, 60 Hz.
4. Velocidad (n)
Dependerá de la polaridad del motor y Frecuencia de la red.
5. Nivel de protección del motor (IP--)
6. Forma constructiva
7. Clase de aislamiento (Y...c).
8. Factor de potencia (cosI)
9. Tipo de servicio (S1...S7).
10. Ejecución de la caja de bornas.
11. Características particulares del motor, además de las generales dadas por el constructor.
12. Dimensionado del motor y peso.
13. Diagramas de par, velocidad, consumos.
14. Ensayos particulares, cuando se trata de motores especiales, no incluidos en el catálogo general del fabricante.

A continuación se estudian las principales características de los motores con carácter general y también particular atendiendo al tipo de motor de que se trate:

Tensión (V) Tensiones trifásicas normalizadas a la frecuencia de 50 Hz: 127 V, 220 V, 380 V, 500 V, 1000 V, 3000 V, 15,000 V, 30,000 V, 45,000 V, 66,000 V, etc. De 50 V a 500 V - Tensión usual. De 500 V a 1000 V - Tensión especial. Las tensiones inferiores a 1,000 V en c.a. se consideran de baja tensión (B.T). Los motores más usados se alimentan en B.T.

En función a la tensión que se dispone en la red, se pedirá el motor, atendiendo principalmente a su forma de conexión.

Para motores con dos tensiones (λ - Δ). La tensión menor corresponde a la conexión triángulo (Δ) y la tensión mayor a la conexión estrella (λ). Las fases del motor deben soportar la misma tensión, tanto que se conecte el motor en estrella, como en triángulo.

Sea por ejemplo un motor en cuya placa de características se lee $V = 220/380$ V.

- Con red de 220 V \rightarrow conexión triángulo (Δ). $V_f = V_L = 220$ V
- Con red de 380 V \rightarrow conexión estrella (λ). $V_f = V_L / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220$ V.
- La mínima tensión, 220 V, corresponde a la tensión a que deben trabajar las fases del motor

A los motores en general se pide que suministren la potencia señalada en la placa de características, aunque la tensión difiera en más o menos 5% de su valor nominal.

Una disminución de tensión lleva consigo un aumento de la intensidad necesaria para conseguir la potencia nominal a la vez que una mejora del factor de potencia y un aumento del deslizamiento. El calentamiento también será mayor.

Potencia: La potencia de un motor viene dada en kW o en CV (caballo de vapor).

$$1 \text{ kW} = 1,000 \text{ W} \quad 1 \text{ HP} = 746 \text{ W} \quad 1 \text{ CV} = 736 \text{ W}$$

Frecuencia (F)

En los suministros de energía eléctrica las variaciones de frecuencia están comprendidas en $\pm 1\%$ de variación. Se suele dar el caso de utilizar motores de 380 V a 50 Hz en redes de 440 V a 60 Hz. La tensión se debería incrementar en un 20% al pasar de 50 a 60 Hz. Si aplicamos la tolerancia de $\pm 5\%$ para tensión, 440 V estaría comprendida en dicha tolerancia (-3.5%). El motor incrementaría su potencia un 20%, como consecuencia del aumento de velocidad en una 20%, al pasar de 50 a 60 Hz.

7.3 RETORNO DE INVERSIÓN CON MOTORES EFICIENTES

EJEMPLO NÚMERO UNO

Un motor grande 200 hp, 1800 rpm (460volts) que opera casi continuamente, en un ambiente industrial a carga completa.

Ciclo de funcionamiento: 8,000 horas por año):

	Motor standard	Motor de alta Eficiencia
Eficiencia	92.4%	96.2%
Potencia de salida (0.7457.kW/hp)	149.1kW	149.1 kW
Potencia de entrada	161.4kW	155.0kW
Pérdida a una carga del 100%	12.3kW	5.9kW
Ahorros de potencia		6.4kW
Costo mayor del motor		\$2.608
Ahorro de energía a una carga Del 100%		51,200kWh por año
Ahorro en dólares a \$0.0553 por kWh(*) Recuperación		\$2,831.36 por año 11 meses

El ahorro es permanente. Una vez recuperada la inversión, el ahorro continúa durante toda la vida útil del motor.

EJEMPLO NÚMERO DOS

La recuperación es a corto plazo aun en el caso de un motor industrial mucho mas pequeño y por consiguiente, menos eficiente, de 5hp, 1800 rpm(460 volts) porque funciona a tiempo parcial (aproximadamente 4,000 horas por año).

	Motor standar	Motor de alta Eficiencia
Eficiencia	84.0%	89.5%
Potencia de salida	3.73kW	3.73kW
Potencia de entrada	4.44kW	4.17kW
Pérdida a una carga del 100%	0.71kW	0.44kW
Ahorros de energía		0.27kW
Costo mayor del motor		\$94.80
Ahorro de energía a una carga Del 100%		\$1,080kWh por año
Ahorro en dólares a \$0.0553 por kWh(*) Recuperación		\$59.72 por año 1 años 7 meses

Fuente: Copper Development Asociación Inc. (Asociación de Desarrollo del Cobre)

Publicación de PROCOBRE - Perú

(*) Precio medio del Sector Industrial a Diciembre de 1998

Fuente: Boletín Nº 1, Noviembre 1999, Dirección General de Electricidad

8. RECOMENDACIONES PARA MEJORAR EL USO DE MOTORES ELÉCTRICOS

8.1 APLICACIONES DE LOS MOTORES

- Sistemas de bombeo.
- Sistemas de ascensores.
- Sistemas de ventilación.
- Sistemas de aire acondicionado.

8.2 MEJORAS EN LOS MOTORES

- Mejorar la tensión de alimentación.
- Reemplazo por otros de mayor eficiencia.
- Alternancia de uso en caso de ascensores.
- Optimización en sistemas de bombeo.
- Compensación reactiva en todos los casos.
- Uso de variadores de velocidad.

8.3 MEJORAS EN SISTEMAS DE BOMBEO

- Cambio de válvulas y tuberías en el sistema sanitario.
- Reducción de horas de uso de las bombas.
- Reemplazo y Utilización de motores de alta eficiencia.
- Adecuación de motores a la capacidad de trabajo.
- Evitar accionamientos sobredimensionados.
- Programación en el arranque de los motores.

8.4 MEJORAS EN ASCENSORES

- Alternancia en el uso de ascensores, exclusivo para servicio a pisos pares e impares.
- Utilización y aplicación de arrancadores de estado sólido.
- Aplicaciones de variadores de velocidad.

ING. CIP EDUARDO TIRAVANTI

Email: etiravanti@stilar.net

Web: www.stilar.net