

Motores eléctricos



Contenido

1	<i>Introducción.....</i>	3
2	<i>Eficiencia en un motor eléctrico.....</i>	3
3	<i>Reparaciones de un motor eléctrico.....</i>	5
4	<i>Factor de potencia</i>	6
5	<i>Motores eléctricos y su relación con la demanda eléctrica</i>	27
6	<i>Recomendaciones generales.....</i>	28

1 Introducción

Esta sección contiene recomendaciones útiles para optimizar el consumo de energía en sus instalaciones con motores eléctricos.

Alrededor del 70% del consumo de la energía eléctrica en la industria se debe al funcionamiento de los motores eléctricos.

El ahorro comienza desde la selección apropiada de los motores y, después, cuando el motor y su carga operan a su máxima eficiencia.

La guía contiene los siguientes temas:

- Eficiencia en un motor eléctrico
- Reparaciones del motor eléctrico
- Factor de potencia
- Motores eléctricos y su relación con la demanda eléctrica
- Ejemplo de área de oportunidad
- Recomendaciones generales

2 Eficiencia en un motor eléctrico

Qué es eficiencia:

La eficiencia es la medida de la capacidad de un motor eléctrico para convertir la potencia eléctrica que toma de la línea en potencia mecánica útil.

Disminución de eficiencia:

No toda la energía eléctrica que un motor recibe, se convierte en energía mecánica. En el proceso de conversión, se presentan pérdidas, por lo que la eficiencia nunca será del 100%. Si las condiciones de operación de un motor son incorrectas o éste tiene algún desperfecto, la magnitud de las pérdidas, puede superar con mucho las de diseño, con la consecuente disminución de la eficiencia.

Cálculo de eficiencia

El cálculo de eficiencia se hace con la relación de la potencia mecánica entre la potencia eléctrica expresada en porcentaje.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia mecánica}}{\text{Potencia eléctrica}} \times 100$$

Las unidades de potencia deben ser iguales.

- La potencia eléctrica se expresa en kilowatts (kW)

- La potencia mecánica en caballos de potencia (CP o HP)

Equivalencias útiles para la conversión de unidades.

- 1CP = 0.746 kW
- 1kW= 1.34 CP

Ejemplo

Si un motor de 100 CP toma de la línea 87.76 kW tiene:

$$\begin{aligned}\text{Potencia mecánica} &= 100 \times 0.746 \\ &= 74.6 \text{ kW}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Eficiencia} &= \frac{74.6}{87.76} \times 100 \\ &= 85\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Pérdidas} &= 87.76 - 74.6 \\ &= 13.16 \text{ kW}\end{aligned}$$

Entonces el motor convierte el 85% de su energía eléctrica en mecánica y pierde el 15% en el proceso de conversión. En términos prácticos, se consume (y se paga) la energía utilizada para hacer funcionar al motor.

Reducción de pérdidas

Para reducir las pérdidas sustituya los motores por motores más eficientes.

Ejemplo:

Sustitución del motor anterior por uno con eficiencia del 90%.

Cálculo de PA:

Para calcular la potencia ahorrada (PA) aplique la ecuación:

$$PA \text{ (kW)} = 0.746 \times CP \left(\frac{100}{E_1} - \frac{100}{E_2} \right)$$

Donde:

0.746 = Factor de conversión de CP a kW

CP = Caballos de potencia

E₁ = Motor con menor eficiencia

E₂ = Motor con mayor eficiencia

Ejemplo

Suponga que los dos motores trabajaran 3000 horas al año. Esto es:

- 12 horas diarias.
- 5 días de la semana
- 50 semanas por año

La energía ahorrada anualmente equivale a:

$$PA = 0.746 \times 100 \left(\frac{100}{85} - \frac{100}{90} \right) \text{ kW} = 4.87 \text{ kW} \quad (\text{disminución de potencia})$$

$$3000 \text{ horas} \times 4.87 = 4,610 \text{ kWh}$$

Ejercicio

Multiplique estos kWh por el costo de la tarifa que corresponda al servicio que usted tenga, para obtener el ahorro monetario por utilizar el motor de mayor eficiencia.

Qué tomar en cuenta

Los incrementos en el costo de los energéticos a nivel mundial, han orientado a los fabricantes de motores a construir, principalmente, motores de alta eficiencia, con rendimientos de hasta 96% y cuyo costo adicional sobre los convencionales se puede pagar rápidamente con los ahorros que se tienen en el consumo.

Vale la pena considerar su utilización.

3 Reparaciones de un motor eléctrico

Reparación inadecuada

Un motor mal reparado gastará más energía que antes. Esto ocasiona incremento en pérdidas, y en motores de corriente alterna, la reducción del factor de potencia. Es decir, disminuye su eficiencia.

Ejemplo

Un motor que sufrió un desperfecto en su devanado hay que rebobinarlo: disminuirá su eficiencia, si durante el proceso de reparación se presenta:

- Calentamiento desmedido del hierro al quitar el devanado.
- Daños en las ranuras al quitar el devanado dañado y montar el nuevo
- Diferente calidad y calibre del alambre
- Diferente número de vueltas
- Daños a los cojinetes y mal alineamiento
- Mayor tiempo de secado final

Recomendaciones

Considere en la reparación de un motor:

- El procedimiento Para quitar el devanado dañado
- Personal calificado
- Alta calidad en los materiales

También ponga especial atención a las partes mecánicas:

- Eje
- Cojinetes ó rodamientos
- Sistema de ventilación o enfriamiento.

Los desperfectos mecánicos, con frecuencia, ocasionan los daños en los devanados. Cuando los daños sean mayores, será más económico sustituir un motor que componerlo. Evalúe técnica y económicamente la posibilidad de hacerlo y si lo decide, utilice motores de alta eficiencia.

4 Factor de potencia

Tipos de cargas en circuitos eléctricos

En términos generales, se distinguen cuatro tipos de cargas eléctricas al conectar un equipo a una red por la que circula corriente eléctrica expresada en amperes (A) y voltaje expresado en volts (V).

Los tipos de cargas eléctricas son:

- Cargas resistivas
- Cargas inductivas
- Cargas capacitivas
- Cargas combinadas

Cargas resistivas

Las cargas resistivas corresponden a una resistencia eléctrica designada con la letra R y expresada en ohms (Ω).

Las cargas resistivas pueden encontrarse en equipos como:

- Lámparas incandescentes
- Hornos
- Platinas de prensas

La energía eléctrica que requieren estos equipos para funcionar es transformada en energía lumínica o calorífica, en cuyo caso el valor del factor de potencia es de 1.0.

Circuito resistivo

En un circuito puramente resistivo, la corriente está en fase con el voltaje y es función inmediata de éste. Por lo tanto, si el voltaje y la corriente están en fase, tenemos que:

$$I = \frac{V}{R}$$

La siguiente figura presenta el diagrama vectorial correspondiente a las cargas resistivas.

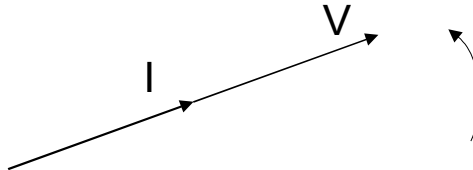


Figura 1 Diagrama del vector de un circuito resistivo

La resistencia eléctrica consume potencia en watts igual a:

$$P = VI = RI^2 = \frac{V^2}{R}$$

Cargas inductivas

Las cargas inductivas se encuentran en cualquier lugar donde haya bobinados involucrados, como en:

- Equipos electromecánicos, como motores eléctricos
- Balastros
- Transformadores

Estos equipos, además de consumir potencia activa, requieren potencia reactiva para su propio funcionamiento y, por ello, trabajan con un factor de potencia menor a 1.0. Precisamente, las cargas inductivas son el origen del bajo factor de potencia.

Circuito inductivo

En un circuito puramente inductivo, la corriente no está en fase con el voltaje, porque va retrasada en 90 grados eléctricos.

La siguiente figura presenta el diagrama vectorial correspondiente a las cargas inductivas.

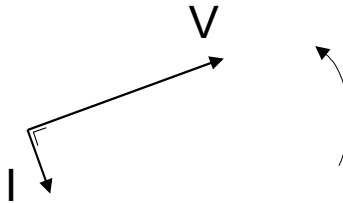


Figura 2 Diagrama del vector de un circuito inductivo

Cargas capacitivas

Las cargas capacitivas se presentan en los capacitores o condensadores y se caracterizan porque la corriente está adelantada con respecto del voltaje 90 grados eléctricos.

Circuito capacitivo

En un circuito puramente capacitivo, teóricamente no existe consumo de energía aun cuando haya corriente circulando. Las cargas capacitivas generan potencia reactiva expresada en volts-amperes-reactivos (VAR).

La siguiente figura presenta el diagrama vectorial correspondiente a las cargas capacitivas.

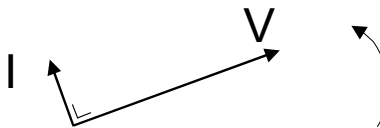


Figura 3 Diagrama del vector de un circuito capacitivo

Cargas combinadas

En la práctica, una carga no está constituida solamente por cargas resistivas, inductivas o capacitivas. Estas tres cargas, en la mayoría de los casos, coexisten en los circuitos eléctricos. Las distintas cargas son, usualmente, abastecidas directamente de la red principal de suministro eléctrico.

Tipos de potencias

Para comprender el factor de potencia se tendrán que revisar los siguientes tipos de potencia:

- Activa
- Reactiva
- Aparente

Potencia activa

Los diferentes dispositivos eléctricos convierten la energía eléctrica en otras formas de energía, como: mecánica, lumínica, térmica, química, etc. A la energía consumida por estos dispositivos, que es capaz de producir trabajo útil, se le conoce como potencia activa y es similar a la energía consumida por una resistencia eléctrica; su símbolo es **P** y sus unidades son los **watts (W)**.

Potencia reactiva

Los motores, transformadores y otros equipos, además de utilizar potencia activa para realizar un trabajo, requieren un suministro de potencia reactiva para generar el campo magnético necesario para funcionar. La potencia reactiva no produce por sí misma ningún trabajo. Ésta se simboliza con la letra **Q** y sus unidades son los **volts-ampers-reactivos (VAR)**.

Potencia aparente

La potencia aparente o total es la suma geométrica de las potencias activa y reactiva, o bien el producto de la corriente y el voltaje; su símbolo es **S** y sus unidades se expresan en **volts-ampers (VA)**.

Triángulo de potencias eléctricas

La siguiente figura ilustra los diferentes tipos de potencia eléctrica.

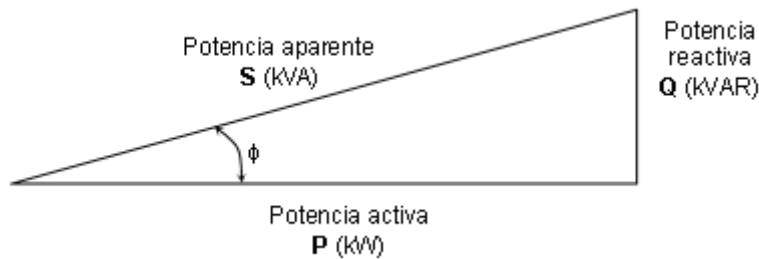


Figura 4 Triángulo de potencias

De la figura anterior se observa, además:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad \text{y} \quad \tan \phi = \frac{Q}{P}$$

¿Qué es factor de potencia (FP)?

El factor de potencia (FP o $\cos \phi$) es la relación entre la potencia activa (en kilowatts, kW), y la potencia aparente en kilovolts-amperes (kVA), y describe la relación entre la potencia de trabajo o real y la potencia total consumida.

El FP está definido por la siguiente ecuación:

$$FP = \frac{P}{S} = \cos \phi$$

Qué expresa

En términos generales, el factor de potencia expresa el desfaseamiento o no de la corriente con relación al voltaje.

Cómo se utiliza

El factor de potencia se utiliza como indicador del correcto aprovechamiento de la energía eléctrica. Puede tomar valores entre 0 y 1.0, siendo la unidad (1.0) el valor máximo de FP y, por tanto, el mejor aprovechamiento de energía.

Instalaciones eléctricas

Hemos visto en cargas inductivas cómo los motores, balastos, transformadores, etc., son el origen del bajo factor de potencia, ya que en este tipo de equipos el consumo de corriente se desfasa con relación al voltaje.

¿Qué ocurre si el factor de potencia es inferior a 1.0?, los equipos consumen energía reactiva. Esto provoca un incremento en la corriente eléctrica que circula en las instalaciones del consumidor y de la compañía suministradora.

Además, cuando el factor de potencia disminuye demasiado, los excesos de corriente pueden provocar daños en las instalaciones eléctricas por efecto de sobrecargas y alteraciones en la regulación de la tensión, con lo cual empeora el rendimiento y funcionamiento de los equipos.

Corriente nominal

Para una potencia constante (kW), la cantidad de corriente de la red se incrementará en la medida que el factor de potencia disminuya, como se ve en el diagrama. Por ejemplo, con un factor de potencia igual a 0.5, la cantidad de corriente para la carga será dos veces la corriente útil; en cambio, para un factor de potencia igual a 0.9, la cantidad de corriente será 10% más alta que la corriente útil.

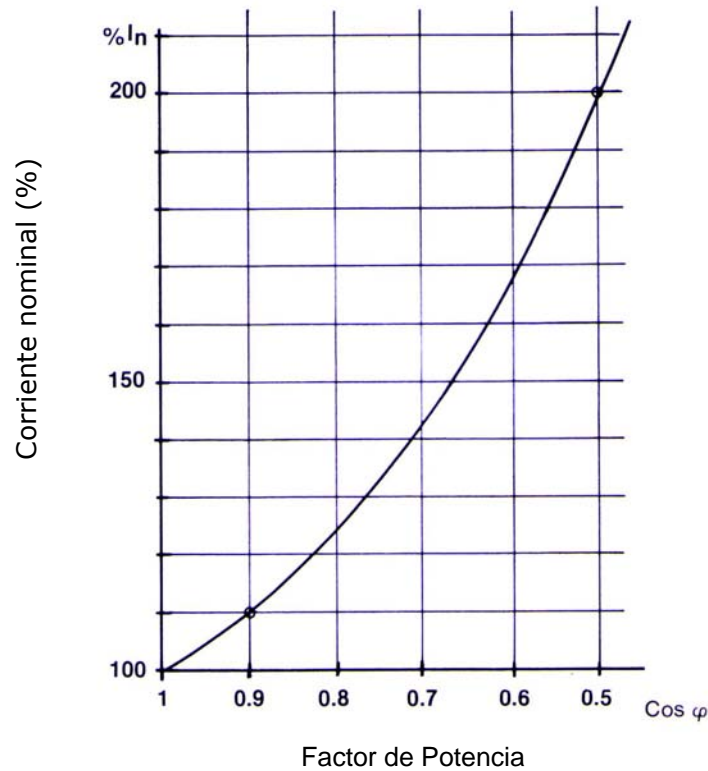


Figura 5 Diagrama de corriente nominal afectada por el factor de potencia

Las instalaciones eléctricas que operan con un factor de potencia menor a 1.0, además de afectar la red eléctrica en alta y baja tensión, tienen las siguientes consecuencias:

Consecuencia	Descripción
Incremento de las pérdidas por efecto Joule	<p>La potencia que se pierde por calentamiento está dada por la expresión I^2R, donde I es la corriente total y R es la resistencia eléctrica de los equipos (bobinados de generadores y transformadores, conductores de los circuitos de distribución, etc.). Las pérdidas por efecto Joule se manifestarán en:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Calentamiento de cables • Calentamiento de embobinados de los transformadores de distribución • Disparo sin causa aparente de los dispositivos de protección <p>El sobrecalentamiento causa el deterioro irreversible del aislamiento de los conductores que, además de reducir la vida útil de los equipos, provoca cortos circuitos.</p>

Sobrecarga de los generadores, transformadores y líneas de distribución.	El exceso de corriente debido a un bajo factor de potencia, ocasiona que los generadores, transformadores y líneas de distribución trabajen sobrecargados y reduzcan su vida útil, ya que estos equipos se diseñan para un cierto valor de corriente y para no dañarlos, se deben operar sin que éste se rebase.
Aumento de la caída de tensión	El aumento de la caída de tensión resulta en un insuficiente suministro de potencia a las cargas (motores, lámparas, etc.). Estas cargas sufren una reducción en su potencia de salida que afecta a: <ul style="list-style-type: none"> • Embobinados de los transformadores de distribución. • Cables de alimentación. • Sistemas de protección y control.
Disminución de la potencia en transformadores	La capacidad de carga instalada en KVA en los transformadores de distribución se reduce.
Incremento en la facturación eléctrica	El bajo factor de potencia implica pérdidas que afectan a la compañía suministradora y penaliza al usuario haciendo que pague más por su electricidad.

Cargos y bonificaciones

En México, de acuerdo con la tarifa y el Diario Oficial de la Federación del día 10 de noviembre de 1991, cuando el factor de potencia tenga un valor inferior a 0.9, el suministrador de energía eléctrica tiene derecho a cobrar al usuario un cargo o penalización.

Cálculo del porcentaje de recargo

El usuario tendrá que pagar la cantidad que resulte de aplicar a la factura el porcentaje de recargo por bajo factor de potencia ($FP < 0.9$), según la siguiente ecuación:

$$\text{Penalización (\%)} = \frac{3}{5} \times \left[\frac{0.9}{FP} - 1 \right] \times 100$$

Cálculo del porcentaje de bonificación

El suministrador tiene la obligación de bonificar al usuario la cantidad que resulte de aplicar a la factura el porcentaje de bonificación por alto factor de potencia ($FP > 0.9$), según la siguiente ecuación:

$$\text{Bonificación (\%)} = \frac{1}{4} \times \left[1 - \frac{0.9}{\text{FP}} \right] \times 100$$

Redondeo de valores

Los valores resultantes de la aplicación de estas fórmulas se redondearán a un solo decimal, por defecto o por exceso, según sea o no menor que 5 (cinco) el segundo decimal.

Qué tomar en cuenta

En ningún caso se aplicarán porcentajes de penalización superiores a 120 % (ciento veinte por ciento), ni porcentajes de bonificación superiores a 2.5 % (dos punto cinco por ciento).

Compensación

Las cargas inductivas que se encuentran en una industria, además de requerir potencia activa, demandan un suministro de potencia reactiva para su funcionamiento, lo cual ocasiona un bajo factor de potencia. La potencia reactiva se puede reducir mediante la conexión de capacitores en paralelo con la carga que tenga bajo factor de potencia. Dependiendo de la cantidad de reactivos que entregan los capacitores, se reduce parcial o totalmente la potencia reactiva tomada de la red eléctrica y en consecuencia aumenta el FP. A este proceso se le denomina compensación del factor de potencia.

Cómo compensar

Es importante determinar el valor de la potencia reactiva del capacitor que se necesita para compensar el factor de potencia. Para explicar esto, analice la siguiente figura:

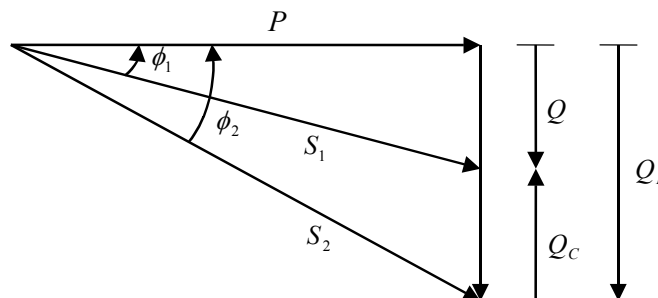


Figura 6 Representación gráfica de la compensación del factor de potencia

Donde:

Q_L es el consumo de reactivos de un motor y S_2 la potencia aparente correspondiente.

Q_C es el suministro de reactivos del capacitor de compensación.

La compensación de reactivos no afecta el consumo de potencia activa, por lo que P es constante.

Como efecto del empleo de los capacitores, el valor del ángulo ϕ_2 se reduce a ϕ_1 ; del mismo modo, la potencia aparente S_2 también disminuye, tomando el valor de S_1 .

Finalmente, al disminuir la demanda de reactivos, se incrementa el factor de potencia ($\cos \phi_1 > \cos \phi_2$).

Cálculo del tamaño del capacitor

Para calcular el tamaño del capacitor deberá tomar en cuenta lo siguiente:

La potencia reactiva del capacitor que es: $Q_C = Q_L - Q$

Del triángulo de potencias, se tiene que: $Q = P \tan(\phi)$

Sustituyendo en la primera ecuación obtenemos:

$$Q_C = P (\tan \phi_2 - \tan \phi_1)$$

Por facilidad, el término $(\tan \phi_2 - \tan \phi_1)$ se sustituye por una constante "K", la cual se presenta en la siguiente tabla para diferentes valores de factor de potencia.

Entonces, $Q_C = P \times K$

Factor de potencia inicial	Factor K														
	Factor de potencia deseado														
	0.86	0.87	0.88	0.89	0.9	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1
0.66	0.545	0.572	0.599	0.626	0.654	0.683	0.712	0.743	0.775	0.810	0.847	0.888	0.935	0.996	1.138
0.67	0.515	0.541	0.568	0.596	0.624	0.652	0.682	0.713	0.745	0.779	0.816	0.857	0.905	0.966	1.108
0.68	0.485	0.512	0.539	0.566	0.594	0.623	0.652	0.683	0.715	0.750	0.787	0.828	0.875	0.936	1.078
0.69	0.456	0.482	0.509	0.537	0.565	0.593	0.623	0.654	0.686	0.720	0.757	0.798	0.846	0.907	1.049
0.70	0.427	0.453	0.480	0.508	0.536	0.565	0.594	0.625	0.657	0.692	0.729	0.770	0.817	0.878	1.020
0.71	0.398	0.425	0.452	0.480	0.508	0.536	0.566	0.597	0.629	0.663	0.700	0.741	0.789	0.849	0.992
0.72	0.370	0.397	0.424	0.452	0.480	0.508	0.538	0.569	0.601	0.635	0.672	0.713	0.761	0.821	0.964
0.73	0.343	0.370	0.396	0.424	0.452	0.481	0.510	0.541	0.573	0.608	0.645	0.686	0.733	0.794	0.936
0.74	0.316	0.342	0.369	0.397	0.425	0.453	0.483	0.514	0.546	0.580	0.617	0.658	0.706	0.766	0.909
0.75	0.289	0.315	0.342	0.370	0.398	0.426	0.456	0.487	0.519	0.553	0.590	0.631	0.679	0.739	0.882
0.76	0.262	0.288	0.315	0.343	0.371	0.400	0.429	0.460	0.492	0.526	0.563	0.605	0.652	0.713	0.855
0.77	0.235	0.262	0.289	0.316	0.344	0.373	0.403	0.433	0.466	0.500	0.537	0.578	0.626	0.686	0.829
0.78	0.209	0.236	0.263	0.290	0.318	0.347	0.376	0.407	0.439	0.474	0.511	0.552	0.599	0.660	0.802
0.79	0.183	0.209	0.236	0.264	0.292	0.320	0.350	0.381	0.413	0.447	0.484	0.525	0.573	0.634	0.776
0.80	0.157	0.183	0.210	0.238	0.266	0.294	0.324	0.355	0.387	0.421	0.458	0.499	0.547	0.608	0.750
0.81	0.131	0.157	0.184	0.212	0.240	0.268	0.298	0.329	0.361	0.395	0.432	0.473	0.521	0.581	0.724
0.82	0.105	0.131	0.158	0.186	0.214	0.242	0.272	0.303	0.335	0.369	0.406	0.447	0.495	0.556	0.698
0.83	0.079	0.105	0.132	0.160	0.188	0.216	0.246	0.277	0.309	0.343	0.380	0.421	0.469	0.530	0.672
0.84	0.053	0.079	0.106	0.134	0.162	0.190	0.220	0.251	0.283	0.317	0.354	0.395	0.443	0.503	0.646
0.85	0.026	0.053	0.080	0.107	0.135	0.164	0.194	0.225	0.257	0.291	0.328	0.369	0.417	0.477	0.620
0.86	---	0.027	0.054	0.081	0.109	0.138	0.167	0.198	0.230	0.265	0.302	0.343	0.390	0.451	0.593
0.87	---	---	0.027	0.054	0.082	0.111	0.141	0.172	0.204	0.238	0.275	0.316	0.364	0.424	0.567
0.88	---	---	---	0.027	0.055	0.084	0.114	0.145	0.177	0.211	0.248	0.289	0.337	0.397	0.540
0.89	---	---	---	---	0.028	0.057	0.086	0.117	0.149	0.184	0.221	0.262	0.309	0.370	0.512
0.90	---	---	---	---	---	0.029	0.058	0.089	0.121	0.156	0.193	0.234	0.281	0.342	0.484
0.91	---	---	---	---	---	---	0.030	0.060	0.093	0.127	0.164	0.205	0.253	0.313	0.456
0.92	---	---	---	---	---	---	---	0.031	0.063	0.097	0.134	0.175	0.223	0.284	0.426
0.93	---	---	---	---	---	---	---	---	0.032	0.067	0.104	0.145	0.192	0.253	0.395
0.94	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.034	0.071	0.112	0.160	0.220	0.363
0.95	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.037	0.078	0.126	0.186	0.329
0.96	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.041	0.089	0.149	0.292
0.97	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.048	0.108	0.251
0.98	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.061	0.203
0.99	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.142

Tabla 1 Tabla. Factor o constante "K" que sustituye al término $(\tan\phi_2 - \tan\phi_1)$.

Ejemplo

Determine la potencia reactiva necesaria para incrementar el factor de potencia actual de 0.83 a 0.96, si la potencia promedio es de 720 KW.

Paso	Acción
1	Localice el factor de potencia inicial 0.83
2	Localice el factor de potencia deseado 0.96
3	Localice el valor K donde confluyen el factor de potencia inicial y deseado. $K = 0.380$
4	Determine la potencia reactiva en kVAR $\text{Potencia reactiva (kVAR)} = P \times K$ $\text{Potencia reactiva} = 720 \times 0.38 = \mathbf{273.85 \text{ kVAR}}$
5	Busque en listas de capacitores comerciales, la cantidad de capacitores con determinadas potencias para que sumados en conjunto, puedan suministrar los 273.85 kVAR requeridos.

Ventajas de la compensación del factor potencia

La compensación del factor de potencia trae como consecuencia los siguientes beneficios energéticos y económicos:

- Eliminación del cargo por bajo factor de potencia
- Bonificación por parte de la compañía suministradora
- Reducción de pérdidas en los cables
- Disminución de la caída de tensión
- Ahorro en consumo de energía
- Liberación de potencia del transformador en kilovolts-amperes (kVA)

Eliminación del cargo

Recuerde que la suministradora de energía penaliza a aquellos usuarios que tengan un factor de potencia menor a 0.9.

Bonificaciones

Recuerde que la suministradora de energía bonifica a aquellos usuarios que tengan un factor de potencia mayor a 0.9.

Reducción de pérdidas en cables:

La reducción de pérdidas en los cables (I^2R) en watts (W), se puede obtener con el siguiente factor:

$$K = \left[1 - \left(\frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2} \right)^2 \right] \times 100 \quad [\%]$$

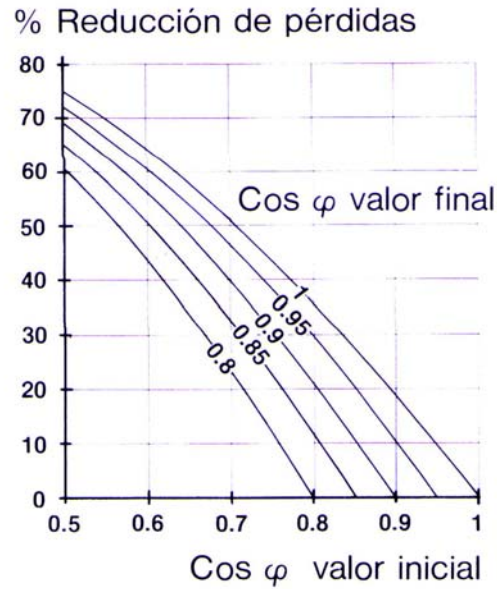


Figura 7 Pérdidas en conductores eléctricos

Disminución de caída de tensión

Esta disminución de la caída de tensión en cables se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\Delta V = I (R \cos \phi + WL \sin \phi)$$

Donde:

ΔV = Disminución en la caída de voltaje en volts (V)

L = Inductancia en henry (Hy)

$W = 2 \pi f$

f = Frecuencia en hertz (Hz)

Ahorro en consumo de energía

Para calcular el ahorro del consumo de energía al pasar de un factor de potencia inicial (Cos ϕ_1) a un valor final (Cos ϕ_2), haga lo siguiente:

Paso	Qué hacer	Cómo hacerlo
1	Determine la corriente de fase.	<p>Utilice la ecuación:</p> $I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} V \cos \phi_1}$ $I_2 = \frac{P}{\sqrt{3} V \cos \phi_2}$ <p>Donde:</p> <p>I_1 = Corriente de fase en amper (A) con $\cos \phi_1$</p> <p>I_2 = Corriente de fase en amper (A) con $\cos \phi_2$</p> <p>P = Carga eléctrica en watts (W)</p>
2	Conozca la resistencia eléctrica total en ohms de los cables de alimentación.	<p>Utilice la ecuación:</p> $R_T = R_{\text{Cable}} \times l_{\text{Cable}}$ <p>Donde:</p> <p>R_T = Resistencia eléctrica total en ohms (Ω)</p> <p>R_{Cable} = Resistencia del cable en ohms (Ω)</p> <p>l_{Cable} = Longitud del cable en metros (m)</p>
3	Determine las pérdidas térmicas al pasar de un FP inicial ($\cos \phi_1$) a un valor final ($\cos \phi_2$)	<p>Utilice las ecuaciones:</p> $P_1 = 3 R_T I_1^2$ $P_2 = 3 R_T I_2^2$ <p>Donde:</p> <p>P_1 = Carga eléctrica en watts (W) con $\cos \phi_1$</p> <p>P_2 = Carga eléctrica en watts (W) con $\cos \phi_2$</p> <p>R_T = Resistencia eléctrica total en ohms (Ω)</p>

4	Determine reducción de pérdida térmica (ΔP)	<p>Utilice las ecuaciones:</p> $\Delta P = P_1 - P_2 \quad [Watts]$ $\Delta P = \left(\frac{P_1 - P_2}{P_1} \right) \quad [\%]$ <p>Donde:</p> <p>ΔP = Reducción de pérdidas térmicas</p>
5	Determine la diferencia de consumo anual de energía eléctrica (kWh/año)	<p>Utilice la ecuación:</p> $Diferencia \text{ consumo de energía} = \frac{(P_1 - P_2) \times (horas / mes) \times 12}{1,000}$

Carga total del transformador

Para liberar potencia del transformador en kilovolts-amperes (kVA).

La carga total del transformador se determina con la siguiente ecuación:

$$kVA = \sqrt{kW^2 + kVAR^2}$$

Donde:

kVA= potencia total del transformador

kW = Potencia activa

kVAR = Potencia reactiva

Liberación de potencia del transformador

La potencia liberada en el transformador mientras se mantiene la misma potencia activa, puede ser expresada por:

$$kVA = kW \left(\frac{1}{\cos \phi_1} - \frac{1}{\cos \phi_2} \right)$$

Donde:

kVA= Potencia liberada del transformador

kW = Carga máxima de potencia activa

$\cos \phi_1$ = Factor de potencia inicial

$\cos \phi_2$ = Factor de potencia final o deseado

FP con datos del recibo eléctrico

Para calcular el factor de potencia con datos del recibo eléctrico, use esta ecuación:

$$FP = \frac{kWh}{\sqrt{kWh^2 + kVARh^2}}$$

Potencias reactivas para elevar FP

Para calcular la potencia reactiva requerida para elevar el factor de potencia de FP_1 a FP_2 , use esta ecuación:

$$kVAR = kW \left[\tan^{-1} (\cos^{-1} FP_1) - \tan^{-1} (\cos^{-1} FP_2) \right]$$

Potencia activa

Para calcular la potencia activa, use esta ecuación:

$$P = I \times \sqrt{3} \times V \cos \phi$$

Corrección de potencia reactiva

Para calcular la corrección de potencia reactiva por tensión, use esta ecuación:

$$kVAR_{\text{totales}} = kVAR \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2$$

Donde:

V_1 = Voltaje de línea

V_2 = Voltaje de diseño (banco de capacitores)

Métodos para compensar el factor potencia

Métodos

Existen varios métodos para corregir o mejorar el factor de potencia, entre los que destacan la instalación de capacitores eléctricos, o bien la aplicación de motores sincrónicos que finalmente actúan como capacitores.

Tipos de instalación de capacitares

Los capacitores eléctricos o bancos de capacitores, se pueden instalar en varios puntos en la red de distribución en una planta. Hay tres tipos principales de instalación de capacitores para compensar la potencia reactiva, como se ve en la siguiente figura.

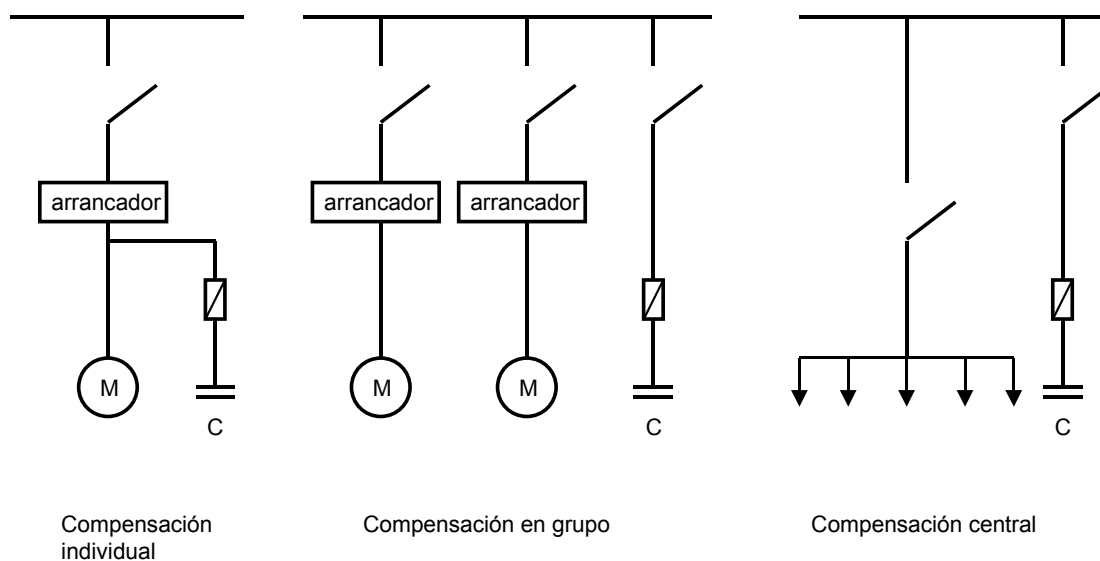


Figura 8 Tipos de instalaciones de capacitores para corregir el factor de potencia

Un cuarto tipo sería la combinación de cualquiera de los tres tipos que se muestran.

Antes de instalar capacitores

Cada instalación corresponde a una aplicación específica, pero antes de instalar capacitores eléctricos, se debe tomar en cuenta los siguientes factores:

- Tipos de cargas eléctricas

- Variación y distribución de las mismas
- Factor de carga
- Disposición y longitud de los circuitos
- Tensión de las líneas de distribución, entre otros

Compensación individual

La compensación individual significa que a cada consumidor de potencia inductiva se le asigna un capacitor que suministra potencia reactiva para su compensación.

Dónde se emplea

La compensación individual se emplea, principalmente, en equipos que tienen una operación continua y cuyo consumo inductivo es representativo. Los dos métodos de compensación individual son:

- Compensación individual en motores eléctricos
- Compensación individual en transformadores de distribución

En motores eléctricos

En motores eléctricos el método de compensación individual es más efectivo, porque el capacitor se instala en cada una de las cargas inductivas a corregir, de manera que la potencia reactiva circula únicamente por los conductores entre el motor y el capacitor.

Nota: Para no incurrir en una sobre compensación de la potencia capacitiva que provoque alteraciones en el voltaje y riesgo de dañar la instalación eléctrica, la potencia del banco de capacitores debe limitarse al 90% de la potencia reactiva del motor en vacío.

Ventajas

Las ventajas de la compensación individual son las siguientes:

- La potencia reactiva es confinada al segmento más pequeño posible de la red cuando los capacitores son instalados cerca de la carga inductiva.
- El arrancador del motor también puede servir como un interruptor para el capacitor, eliminando así, el costo de un dispositivo de control para el capacitor.
- Los capacitores se ponen en servicio sólo cuando el motor está trabajando.
- Todas las líneas quedan descargadas de la potencia reactiva.

Desventajas

Las desventajas de la compensación individual son las siguientes:

- El costo de varios capacitores por separado es mayor que el de un capacitor individual de valor equivalente.
- Los capacitores que no se usan con frecuencia se subutilizan.

Tamaño del capacitor

La potencia del capacitor a conectar directamente con el motor se puede determinar con alguno de los siguientes métodos:

- Multiplique por 1/3 el valor del motor expresado en hp
- Calcule el 40% de la potencia del motor en kW
- Consulte tablas con valores recomendados por NEMA (National Electrical Manufacturers Association), que contienen las potencias máximas sugeridas de los capacitores (kVAr) para la compensación individual de motores en baja tensión (Tablas 2 y 3)

Nota: La compensación individual de motores menores de 10 kW generalmente no se utiliza.

Motor de inducción potencia (hp)	Velocidad nominal en r.p.m. y número de polos					
	3,600	1,800	1,200	900	720	600
	2	4	6	8	10	12
5	2	2	3	3	4	5
7 ½	2 ½	3	3	4	6	7 ½
10	3	3	4	5	6	10
15	5	5	5	7 ½	7 ½	10
20	6	6	7 ½	7 ½	10	15
25	7 ½	6	7 ½	10	10	20
30	7 ½	7 ½	10	10	15	20
40	7 ½	10	15	15	15	25
50	10	15	20	20	20	30
60	10	15	25	20	25	35
75	15	20	25	25	30	40
100	20	25	30	30	35	45
125	25	30	30	40	40	50
150	25	30	35	45	50	60
200	35	40	50	60	70	80
250	40	50	60	70	80	100
300	45	60	70	80	90	110
350	50	70	80	100	100	125
400	70	70	80	110	125	150
450	75	80	100	120	125	150
450	90	90	120	125	140	175

Tabla 2 NEMA diseño B. Motores en baja tensión, par de arranque normal y corriente normal

Motor de inducción potencia (hP)	Velocidad nominal en r.p.m. y número de polos			
	1,800	1,200	900	720
	4	6	8	10
5	2	2 ½	4	---
7 ½	3	3	4	---
10	3	4	5	---
15	4	5	7 ½	---
20	4	5	7 ½	---
25	5	5	10	---
30	5	7 ½	10	20
40	10	10	15	---
50	15	10	20	25
60	15	20	25	25
75	20	20	30	35
100	25	25	40	40
125	30	35	40	45
150	35	40	45	50
200	45	50	60	60
250	50	60	70	75
300	60	70	80	80
350	70	75	90	100

Tabla 3 NEMA diseño C. Motores en baja tensión, alto par de arranque y corriente normal

En transformadores de distribución

Otro método de compensación individual para corregir el factor de potencia es compensar la potencia reactiva en los transformadores de distribución.

La potencia total del banco de capacitores se calcula para compensar la potencia reactiva que absorbe el transformador en vacío, que es del orden del 5 al 10% de la potencia nominal. De acuerdo con las normas técnicas para instalaciones eléctricas, la potencia total del banco de capacitores no debe exceder el 10% de la potencia nominal (en kVA) del transformador. Esto evita los fenómenos de resonancia y sobre tensión en vacío.

Valores de capacitores en transfor-madores

Existen tablas con valores recomendados para la compensación individual de la potencia reactiva en los transformadores de distribución, en donde a la potencia nominal de cada transformador se le ha asignado la correspondiente potencia del capacitor requerido, el cual deberá instalarse en el secundario del transformador, como se indica en la siguiente tabla 4.

Potencia nominal del transformador en kVA	Potencia reactiva del capacitor en kVAR
100	4
160	6
250	15
400	25
630	40
1000	60
1600	100

Tabla 4 Tabla de valores de capacitores para compensación individual en transformadores

Compensación por grupo de cargas

Es aconsejable compensar la potencia inductiva de un grupo de cargas, cuando éstas se conectan simultáneamente y demandan potencia reactiva constante, o cuando se tienen diversos grupos de cargas situados en puntos distintos.

Ventajas

Las ventajas de la compensación en grupo son las siguientes:

- La compensación se realiza por medio de un banco de capacitores común, con su propio interruptor si se conforman grupos de cargas de diferente potencia pero con un tiempo de operación similar.
- Los bancos de capacitores pueden ser instalados en el centro de control de motores.
- El banco de capacitores se utiliza únicamente cuando las cargas están en uso.
- Los costos de inversión se reducen para la adquisición de bancos de capacitores.

Desventaja

La desventaja de la compensación en grupo es que la sobrecarga de potencia reactiva no se reduce en las líneas de alimentación principal; es decir, que seguirá circulando energía reactiva entre el centro de control de motores y los motores.

Compensación centralizada y compensación combinada

Compensación centralizada

El tipo de compensación central, con banco automático, ofrece una solución generalizada para corregir el factor de potencia. Esto se debe a que la potencia total del banco de capacitores se instala en la

acometida, cerca de los tableros de distribución de energía que suministran la potencia reactiva demandada por diversos equipos con diferentes potencias y tiempos de operación.

La potencia total del banco de capacitores se divide en varios bloques que están conectados a un regulador automático de energía reactiva, que conecta y desconecta los bloques que sean necesarios para obtener el factor de potencia, previamente programado en dicho regulador.

Ventajas

Las ventajas de la compensación centralizada son las siguientes:

- Mejor utilización de la capacidad de los bancos de capacitores.
- Mejora en la regulación del voltaje en sistema eléctrico.
- Suministro de potencia reactiva, según los requerimientos del momento.
- Es de fácil supervisión

Desventajas

La desventaja de corregir el factor de potencia por compensación centralizada son:

- Las diversas líneas de distribución no son descargadas de la potencia reactiva.
- Se necesita un regulador automático en el banco de capacitores para compensar la potencia reactiva, según las necesidades de cada momento.

5 Motores eléctricos y su relación con la demanda eléctrica

Tarifas eléctricas

Las tarifas para la industria incluyen los siguientes cargos:

- Cargo por consumo de energía (kWh)
- Cargo adicional por demanda máxima (kW)
- Cargo por bajo factor de potencia
- Cargo por derecho de alumbrado público (DAP)
- Cargo por impuesto al valor agregado (IVA)

Registro de mediciones eléctricas

La demanda de energía se registra con un medidor conforme a la potencia de todos los motores, lámparas y otros aparatos eléctricos, funcionando simultáneamente durante un lapso de 15 minutos.

Considere una instalación con una demanda de 700 kW que incluya la potencia de un grupo de motores de 50 CP que tomen de la red 41 kW cada uno.

Si este grupo de motores pudiera ser operado fuera del período de demanda máxima, el valor de la demanda se reduciría en casi 6%. Que se traduce en la reducción en el monto de facturación eléctrica.

Recomendación: evite el arranque y la operación simultánea de los motores y otros equipos eléctricos sobre todo en el periodo punta, lo que se traduce en ahorros significativos en el monto de facturación.

Ejemplo de área de oportunidad

Un ejemplo que presenta buenas oportunidades de ahorro, se tiene en los equipos de aire comprimido.

Es importante que la potencia del motor acoplado al equipo de compresión de aire corresponda a la potencia requerida por éste.

La eficiencia cae bruscamente para cargas reducidas o cuando trabaja sobrecargado. Además, un motor de inducción sobredimensionado demandará una mayor potencia reactiva con la consiguiente disminución del factor de potencia.

Evite fugas de aire en uniones de:

- Tuberías
- Mangueras
- Válvulas de seguridad de los depósitos acumuladores
- Válvulas de corte (que hacen mal cierre)

- Herramientas neumáticas y otros equipos, etc.

Las fugas representan pérdidas de hasta un 50% en instalaciones descuidadas. Constituyen una carga inútil del motor y un desperdicio de energía que puede reducirse notoriamente mediante la corrección y sellado sistemático de los puntos de escape.

6 Recomendaciones generales

Selección del motor

Selecione:

El motor de acuerdo con su ciclo de trabajo:

- Servicio continuo.
- Operación intermitente

La potencia del motor

El rendimiento máximo se obtiene cuando éste opera entre el 75% y el 95% de su potencia nominal.

El armazón del motor de acuerdo con el ambiente en que va a estar trabajando.

Tipos de motores

Use:

Motores de inducción trifásicos en lugar de monofásicos. En motores de potencia equivalente, su eficiencia es de 3 a 5% mayor y su factor de potencia mejora notablemente.

Montaje de motores

Al montar los motores, verifique:

- La instalación eléctrica
- El montaje de los motores y su carga.
- La conexión a tierra de los motores

Las Normas técnicas de instalaciones eléctricas y de seguridad en los capítulos referentes a motores, y las recomendaciones de los fabricantes son consulta obligada.

Instalación de variadores de velocidad

Instale:

Motores de velocidad ajustable con reguladores electrónicos (variadores de velocidad), en accionamientos donde la carga sea variable y se pueda controlar ajustando la velocidad.

Ejemplo:

En sistemas de bombeo o compresión que deben suministrar caudales variables y que para hacerlo utilicen válvulas u otros dispositivos de control.

Instalación de arrancadores

Instale:

- Arrancadores electrónicos en lugar de los reóstatos convencionales para el arranque de los motores de corriente directa
- Arrancadores a tensión reducida en motores que realicen un número elevado de arranques para evitar un calentamiento excesivo en los conductores y disminuir pérdidas durante la aceleración.
- Arrancadores estrella-delta o de devanado partido, como alternativa, si la carga impulsada no requiere de alto par de arranque. Son más económicos y eficientes aunque el par de arranque se reduce notoriamente.

Instalación de accesorios y periféricos

Instale:

- Acoplamiento flexible en motores sometidos a un número elevado de arranques súbitos para atenuar los efectos de una alineación defectuosa, reducir los esfuerzos de torsión en la flecha del motor y disminuir las pérdidas por fricción.
- Equipos de control de la temperatura del aceite de lubricación de cojinetes de motores de gran capacidad para minimizar las pérdidas por fricción.

Acoplamiento de los motores

- Acople directamente el motor a la carga, siempre que el accionamiento lo permita, para evitar pérdidas en el mecanismo de transmisión
- Prefiera el acoplamiento individual, en accionamientos con un grupo de motores para que cada motor trabaje lo más cerca posible de su máxima carga.

Ventilación

Evalúe la posibilidad de conectar la ventilación sólo durante las bajas velocidades de motores de velocidad ajustable y ventilación separada de equipos auxiliares. Esto reduce el consumo de energía en el sistema de ventilación.

Evite el sobrecalentamiento de los motores. No los conecte en locales reducidos o con poca ventilación.

Tensión eléctrica

Corrija la caída de tensión en los alimentadores. Una tensión reducida en las terminales del motor provoca:

- Incremento de la corriente
- Sobrecalentamiento
- Disminución de su eficiencia.

Las normas permiten una caída máxima del 3% (o del 5% en la combinación de alimentador y circuito derivado) pero se recomienda no rebasar el 1%.

Balancee la tensión de alimentación en los motores trifásicos de corriente alterna. A menor desbalanceo mayor eficiencia. El desequilibrio entre fases no debe exceder nunca el 5%.

Compense la energía reactiva demandada por los motores de corriente alterna más importantes, o con mayor número de horas de funcionamiento, mejorando el factor de potencia de la instalación. Se reducen pérdidas de potencia y la tensión en los conductores.

Qué sustituir

Considere las siguientes recomendaciones para la sustitución de motores o en motores eléctricos:

- Sustituir motores cuando la instalación tenga motores antiguos o de uso intenso.
- En motores con engranes, poleas, bandas u otro tipo de transmisión sustituir por motores de velocidad ajustable con reguladores electrónicos para reducir la velocidad del motor.
- En motores de rotor devanado, sustituir los reguladores con resistencias para el control de la velocidad, por reguladores electrónicos. En las resistencias se consume hasta un 20% de la potencia que se toma de la red.

Mantenimiento

Mantenga bien ajustados y en óptimas condiciones:

- Los sistemas de ventilación y enfriamiento de los motores. El sobrecalentamiento aumenta pérdidas en los conductores y daña los aislamientos
- Los equipos de protección contra sobrecalentamientos o sobrecargas en los motores. Los protegen de daños mayores.

- El interruptor de arranque de los motores monofásicos de fase partida. Su mal funcionamiento provoca un sobrecalentamiento en los conductores con una pérdida de energía y, en caso extremo la falla del motor
- Las portaescobillas, escobillas, conmutadores y anillos colectores en motores de corriente directa, síncronos y de rotor devanado. Un asentamiento incorrecto de las escobillas sobre el conmutador en los anillos colectores provoca sobrecalentamientos y pérdidas de energía.
- Los medios de transmisión entre el motor y la carga, tales como: poleas, engranes, bandas y cadenas.
- Los cojinetes del motor. Repárelos o sustitúyalos si están en mal estado o si su lubricación es insuficiente o excesiva. Siga las instrucciones del fabricante para una correcta lubricación.

Mantenimiento preventivo

Haga por rutina:

- Limpieza del motor para eliminar la suciedad, polvo y objetos extraños que impidan su funcionamiento óptimo. La regularidad dependerá de las condiciones en las que el motor este trabajando, pero se recomienda desmontarlo al menos una vez al año.
- Inspección del motor, incluyendo lecturas de corriente, potencia (kW), velocidad (rpm), resistencia de aislamiento, etc., con objeto de verificar si se mantienen en condiciones apropiadas de funcionamiento y eficiencia, y poder tomar acciones correctivas, cuando se requieran.
- Revisión de conexiones del motor, del arrancador y accesorios. Las conexiones flojas o mal hechas ocasionan un mal funcionamiento y pérdidas.
- Alineación del motor con la carga impulsada. Una alineación defectuosa puede incrementar las pérdidas por rozamiento y en caso extremo, ocasionar daños mayores en el motor y, en la carga.
- Revisión de manuales de operación. Manténgalos actualizados e incorpore las modificaciones.

Reparaciones

Repare o cambie los ejes del motor y de la transmisión, si se han doblado. Un eje en mal estado incrementa las pérdidas por fricción y puede ocasionar daños en los cojinetes del motor.

Seguridad

Coloque carteles con instrucciones concretas para los operarios, con la finalidad de que los motores operen con la mayor seguridad y eficiencia.

7 Bibliografía

Compendio de información de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía:
<http://www.conuee.gob.mx>