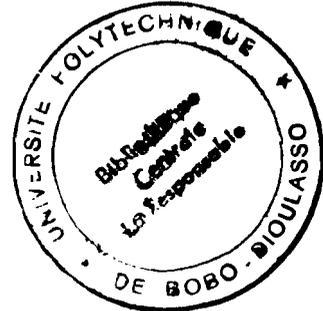


**UNIVERSITE DE CAMAGUEY  
FACULTE D'ELECTROMECHANIQUE  
DEPARTEMENT D'INGENIERIE  
ELECTRIQUE**



## ***MEMOIRE DE FIN DE CYCLE***

MEM 201A

BAD, AGU

***Titre : Etude des Méthodes de Calculs du Facteur de  
Potence dans l'Industrie.***

***Auteurs : Badolo Blaise B.  
Agusto Da Silva***

***Maîtres : Alfredo Enrique González  
Davel Borges Vasconcellos***

***Cours : 1998 – 1999.***

UNIVERSIDAD DE CAMAGÜEY  
FACULTAD DE ELECTROMECHANICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

## *Trabajo de Diploma*

**Título: Estudio de los métodos de cálculos del  
factor de potencia en la industria.**

**Diplomantes: Badolo Blaise Bayamboue  
Agusto Da Silva Sachonga**

**Tutores: Alfredo Enrique González  
Davel Borges Vasconcellos**

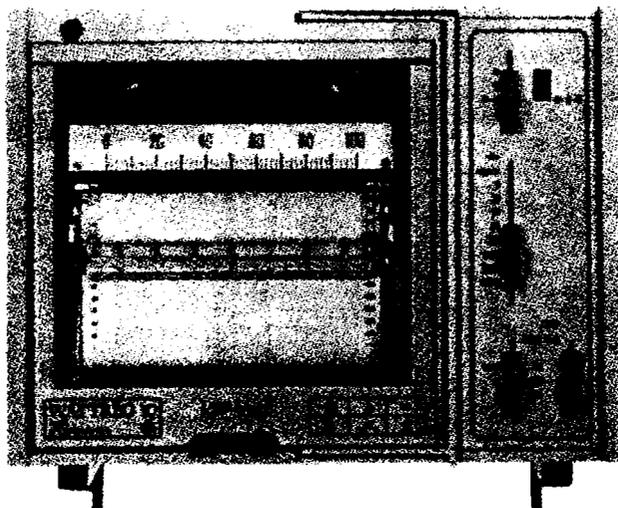
CURSO 1998 - 1999

Universidad de Camagüey  
Departamento de Ingeniería Eléctrica  
Facultad de Electromecánica

# Trabajo de Diploma

ME 11 201 A  
BAD, AGU

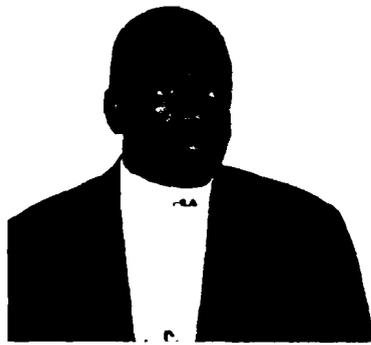
**TITULO:** Estudio de los métodos de cálculos del factor de potencia en la industria.



**DIPLOMANTES** : BADOLO BLAISE BAYAMBOUE  
AGUSTO DA SILVA SACHONGA

**TUTORES** : MSc. Ing. ALFREDO ENRIQUE GONZALEZ  
MSc. Ing. DAVEL BORGES VASCONCELLOS

# RECUERDO DE LOS DIPLOMANTES

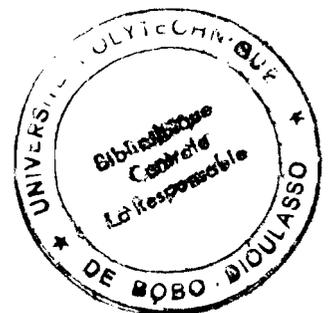


## HOJA DE ACEPTACION

Los abajo firmantes aceptan y avalan los resultados de este trabajo, como terminado y en correspondencia con los objetivos previstos y el nivel científico, profundidad y actualidad necesaria. Así como la liquidación de todas las obligaciones legales con la institución.

	Nombres y apellidos	Firma
Diplomante	Augusto Da Silva Sachonga	_____
Diplomante	Badolo Blaise Bayamboué	_____
Tutor	M.Sc. Alfredo González Digón	_____
Tutor	M.Sc. Davel Borges Vasconcellos	_____
Oponente	Ing. Sierra Gil	_____
Jefe de carrera	Dra. Milagros Diez Rodríguez	_____
Pte tribunal	Santiago Lages Choy	_____

# Pensamiento



## PENSAMIENTO

El caudal de ideas revolucionaria que hemos heredado de nuestras historias, y de toda la humanidad, es nuestro tesoro maspreciado, eso debe ser enriquecido con la practica y el ejemplo, eso debe ser Sagrado por todo revolucionario.

Fidel Castro Ruz

# Dedicattoria

## DEDICATORIA

Este presente trabajo lo dedicamos de todo corazón a nuestros padres, familiares y amigos que de una forma u otra han colaborado con nosotros durante la trayectoria de la carrera.

De la misma forma también lo dedicamos a la revolución cubana en especial a su comandante en jefe Fidel Castro Ruz

# Agradecimientos

## AGRADECIMIENTO

Nuestro más sinceros y profundos agradecimiento a todos los profesores, amigos y compañeros de aula que contribuyeron tanto en la terminación de este trabajo como a nuestra formación profesional.

Un reconocimiento muy especial a nuestro tutor ingeniero Alfredo González Digón por su constante apoyo de búsqueda de bibliografías, y así en la revisión del trabajo que sin su ayuda no hubiera podido realizar este trabajo.

# Indice

# INDICE

Resumen	1
Introducción	2
<b>CAPITULO 1</b>	<b>3</b>
1.1 Base teóricas elementales	3
1.2 Demanda reactiva capacitiva. Unidades de medidas	4
1.3 Demanda aparente. Unidad de medida	5
1.4 Equipos consumidores de energía reactiva	8
1.5 Equipos consumidores de energía reactiva	9
1.6 Generadores de KVAR	10
1.7 Limitando los KW y KVA	11
1.8 Como los capacitores mejoran el Factor de Potencia	13
1.9 Tecnología de los capacitores	14
1.10 Factores que influye en la elección y empleo e instalación de los capacitores	15
1.11 Tipos de capacitores que se encuentran en el mercado	20
<b>CAPITULO 2</b>	<b>23</b>
2.1 Necesidad de mejorar el Factor de Potencia en una instalación	23
2.2 Importancia de tener el Factor de Potencia alto	24
2.3 Tipos de compensación según la ubicación de los capacitores	29
<b>CAPITULO 3</b>	<b>35</b>
3.1 Cálculo de un banco de capacitores	35
3.2 Cálculo de un banco de capacitores mediante el empleo de las facturas emitidas por las empresas generadoras de la electricidad	35
3.3 Cálculo de un banco de capacitores mediante el empleo de las tablas	38
3.4 Cálculo de un banco de capacitores mediante el empleo de instrumentos y equipos registradores	39
Como calcular los KVA reactivos necesarios para mejorar el Factor de Potencia(ABACO)	45
<b>CAPITULO 4</b>	<b>52</b>
4.1 Evaluación de los beneficios obtenidos al incremento de Factor de Potencia por la instalación de un banco de capacitores	52
4.2 Las instalaciones de alumbrado; ahorro de la energía y mejora de Factor de Potencia	53
4.3 Mejora de Factor de Potencia	57
4.4 Mejora de Factor de Potencia en instalación de fuerza	59
<b>CAPITULO 5</b>	<b>79</b>
5.1 Ejemplos de cálculos de potencia reactiva mediante un estudio de la energía eléctrica	79
5.2 Elección del tipo de compensación	81
5.3 Elección del rango de condensador	82
5.4 Estudio del consumo eléctrico (MANELSA)	84
Conclusiones	87
Recomendaciones	88
Bibliografía	89

Resumen

## RESUMEN

En el trabajo que a continuación se les presenta se profundizó un estudio de los diferentes métodos para mejorar el factor de potencia en la industria, ya que la tecnología al nivel mundial cada día avanza, entonces la empresa eléctrica exige que se cumpla los requisitos con la demanda contratada. Por eso, este texto puede ser utilizado como folleto de la asignatura SUMINISTRO ELECTRICO, también puede ser una herramienta muy importante y poderoso para una industria de nuestros días. El mismo esta formado por 5 capítulos, y cada capítulo contiene un análisis teórico, sus circuitos de conexión y los elementos compensadores de energía. Así mismo se realizaron un grupo de ejemplos de cómo mejorar el factor de potencia y estos se encuentran en ultimo capítulo. En la última parte se encuentran los anexos donde con algunas tablas y esquemas que usa en la actualidad.

# Introducción

## INTRODUCCIÓN

El hombre utiliza la energía eléctrica principalmente para calcular, para iluminar, para accionar motores eléctricos, para comunicarse y para realizar ciertos procesos.

Según el tipo de aplicación la energía que se entrega es activa, reactiva es una combinación de ambos. La energía activa es aquella que se convierte en calor o en trabajo mecánico y la reactiva es aquella que crea los campos electromagnéticos.

El problema del factor de potencia es determinante y elemental en las industrias actuales ya que su estudio cada día se hace más importante, por sus aplicaciones constantes en las mismas para disminuir la demanda contratada y cumplir con las exigencias de la Empresas Eléctricas.

# Capítulo II

## CAPITULO I Generalidades.

### 1.1 Bases teóricas elementales.

En una red eléctrica a la que aplicamos un voltaje  $V(+)$  en función del tiempo, aparecerá una intensidad  $I(+)$ , siendo la potencia instantánea:

$$P(+)=V(+)*I(+)$$
 (1.1)

Si se trata de un circuito con inductancia pura, sometido a una tensión sinusoidal  $V=V_m \cdot \cos(\omega t)$ , la corriente generada,  $I=I_m \cdot \cos(\omega t-90)$ , estará retrasada  $90^\circ$  y la potencia instantánea será:

$$P=V * I * \cos(\omega t - 90) = \frac{V_m * I_m}{2} * \sin(2\omega t)$$
 (1.2)

En el caso de carga capacitiva, como sabemos, el desfase es en adelanto.

#### **Demanda reactiva inductiva. Unidades de medida.**

Si conectamos el voltaje descrito anteriormente a una bobina, como por ejemplo, la bobina de un interruptor magnético, se producirá una demanda que será fundamentalmente reactiva inductiva; también existe una pequeña componente activa a causa de la resistencia del alambre de la bobina y las láminas del núcleo. Todo enrollado conectado a un voltaje alterno, demandará energía reactiva inductiva, necesaria para crear y mantener el campo magnético.

La unidad de medida es el VAR. Si queremos medir esta potencia en miles de VAR, obtenemos el KVAR.

El valor promedio de la demanda reactiva inductiva es igual a cero, a causa de que los valores de esta demanda varían entre valores positivos y negativos iguales a la mitad del producto del voltaje máximo multiplicado por el valor máximo de la corriente ( $V_{max} \cdot I_{max}$ ). La frecuencia de esta onda es el doble de la onda sinusoidal original del voltaje aplicado, de manera que pasa por cero cada cuarto de ciclo.

## 1.2 Demanda reactiva capacitiva. Unidades de medida

Si el voltaje alterno de que hemos hablado lo conectamos a un condensador, se producirá una demanda que fundamentalmente será capacitiva; existe una pequeña componente activa a causa de las pérdidas del dieléctrico del condensador.

Todo condensador, conectado a un voltaje alterno demandará energía reactiva capacitiva.

La unidad de medida de la demanda reactiva capacitiva es el VA capacitivo, y se abrevia VAC. Si queremos, medir esta potencia reactiva en miles de VA capacitivos, tenemos el KVA capacitivo, que se abrevia KVAC. Sin embargo, la abreviatura más utilizada más utilizada en nuestro país es la abreviatura de la literatura norteamericana CKVA. Esta es la más conocida por nuestros técnicos y la que más se encuentra en la literatura técnica.

El valor promedio, de la demanda reactiva capacitiva, al igual que el de la inductiva, también es cero (Fig. 1). Si superponemos ambas curvas, como se muestra en la figura 2, notaremos que los ciclos positivos de una corresponden con los ciclos negativos de la otra.

Este efecto es la base de la compensación de la demanda reactiva inductiva mediante capacitores estáticos y condensadores sincrónicos.

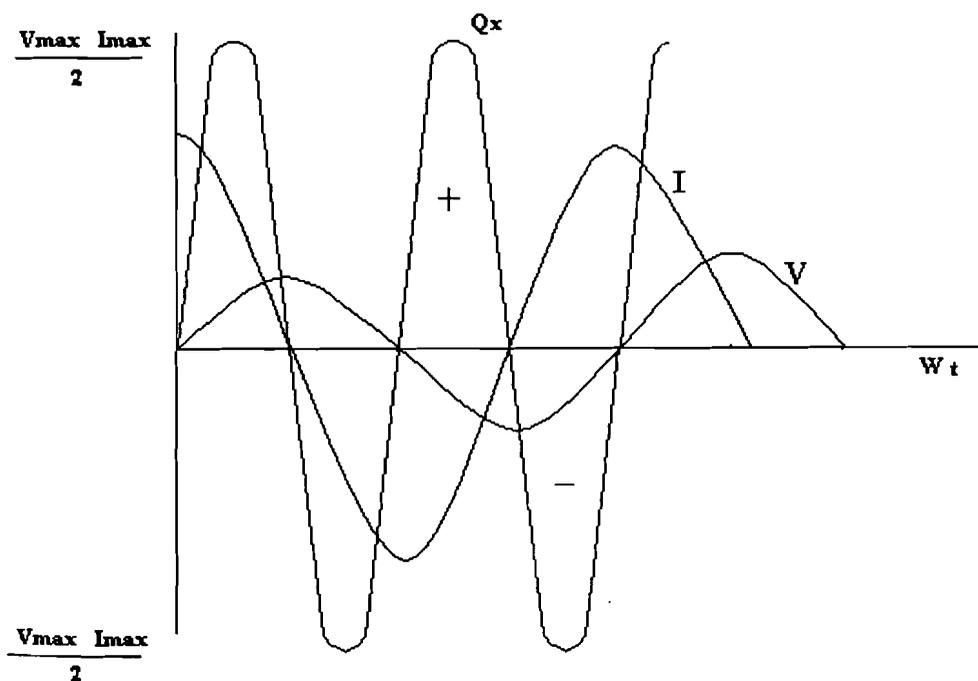


Fig. 1 Relación entre la corriente, el voltaje y la potencia reactiva capacitiva.

### 1.3 Demanda aparente. Unidades de medida.

Según lo anteriormente expuesto, vemos que además de la demanda activa que todos conocemos, y que se mide en watt o kilowatt, existe una demanda reactiva que se mide en VA capacitivo, según se trate de un enrollado o de un condensador. Vimos también que estas demandas reactivas pueden ir acompañadas de una componente activa. Hasta este momento hemos tratado de demanda y de energía indistintamente.

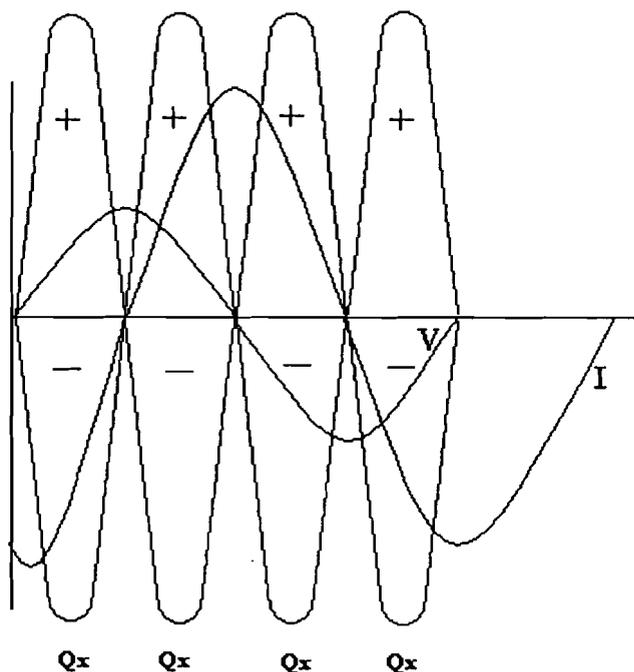


Fig. 2 Relación entre la potencia reactiva inductiva y la potencia reactiva capacitiva.

Es bueno aclarar que la demanda es la necesidad instantánea de potencia, bien sea ésta reactiva o activa. La energía se mide según el tiempo que actúa esta demanda. La medida de la energía activa, de acuerdo con lo expuesto, se toma en kilowatt hora y se abrevia KW. H, a su vez, tanto para la inductiva como para la capacitiva. También hemos hablado de condensadores y capacitores.

Es necesario aclarar que ambos términos se emplean indistintamente para denominar este equipo. (Capacitor se deriva de la nomenclatura norteamericana).

La combinación resultante de la demanda activa y la reactiva es la demanda aparente. El tiempo que actúa esta demanda aparente también libera energía aparente. Esta medida es el KVA. H, aunque esta medida en la práctica no se emplea.

La unidad de medida de la demanda aparente es el VA. Si queremos medir la demanda aparente en miles de volt ampére obtenemos el KVA y es la medida más usual de la demanda

aparente. En esta unidad de medida se dan, generalmente, las capacidades de los transformadores y otros equipos del Sistema Electroenergético Nacional.

Aquí nos encontramos con un caso curioso. Las demandas activa y reactiva sea inductiva o capacitiva, no se puede sumar aritméticamente. La aparición simultánea de 10 KV Y 10 KVAR, inductivo o capacitivo, no da como resultado 20 KVA, de demanda aparente, sino 14,08 KVA. Esto se debe a que la demanda activa es proporcional con el coseno, y la demanda reactiva es proporcional al seno del ángulo existente entre la corriente y el voltaje. Al estar ambas funciones desfasadas  $90^\circ$  una con respecto a la otra, según lo visto en el punto 2, se deduce que los vectores que las representan también estarán colocados en ángulo recto uno con respecto al otro, o sea, que en la realidad estas demandas activas y reactivas se encuentran colocadas perpendicularmente, a  $90^\circ$  una con respecto a la otra.

En la figura 3 se muestra que las demandas inductivas y capacitivas se encuentran situadas ambas perpendicularmente a la demanda activa, en la misma dirección, pero en sentido contrario la inductiva con respecto a la capacitiva. Las referencias tomadas en el dibujo son las más utilizadas en la literatura técnica, aunque la colocación puede ser arbitraria siempre que se respete la colocación relativa de una con respecto a la otra.

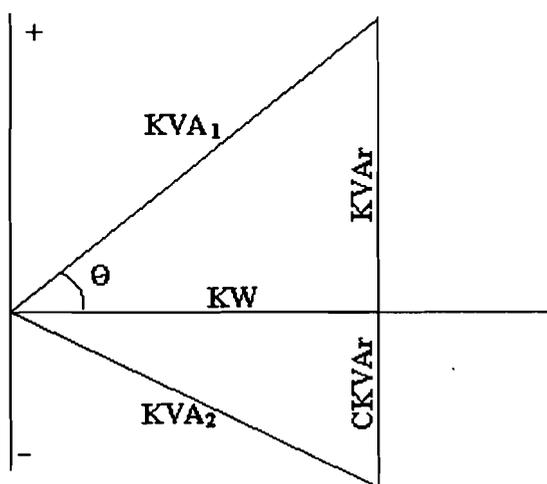


Fig. 3 Situación relativa de la potencia aparente, activa, reactiva inductiva y reactiva capacitiva.

La demanda aparente se obtiene en la práctica multiplicando el valor del voltaje por el amperaje, medidos con los respectivos instrumentos que se emplean para leer cada una de estas magnitudes. De aquí el nombre de demanda aparente, ya que en realidad esta demanda está compuesta por los componentes activo y reactivo; el primer componente es él en realidad realiza trabajo útil.

De lo antes expuesto se deduce la importancia de conocer y controlar la demanda reactiva, ya que aunque esta demanda no produce trabajo útil ni es registrada por el metrocontador de energía activa, está presente en el Sistema Electroenergético e influye en la magnitud de la potencia aparente, que es la que en definitiva va a cargar los equipos y conductores que intervienen en la transmisión y distribución de la energía eléctrica. En el punto 18 trataremos sobre de medir esta demanda.

En la figura 4 vemos que la magnitud de la demanda aparente en el primer y segundo caso es igual; sin embargo, en este último la demanda activa, que realiza trabajo útil, es mucho más pequeña que el primero. Si pudiéramos reducir la demanda reactiva en el segundo caso, podríamos utilizar corrientes y capacidades más pequeñas para servir y utilizar la demanda activa que muestra la figura 4.

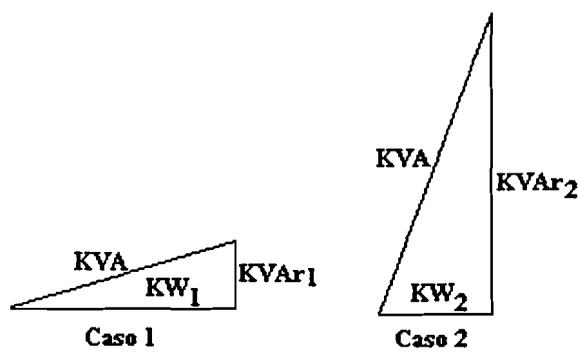


Fig. 4 Reducción de la potencia real que servirse a causa de un factor de potencia bajo, manteniendo la potencia aparente invariable.

Ya sabemos que los consumidores tienen una demanda aparente que posee como componentes una demanda activa y una reactiva. La relación que existe entre la demanda activa o real y la demanda aparente se denomina factor de potencia. Dicho con otras palabras, el factor de potencia indica el tanto por ciento de la demanda aparente es efectivamente para realizar trabajo. Si, por ejemplo, el factor de potencia de una instalación es 0,86, esto quiere decir de la demanda aparente, o lo que es lo mismo, de la corriente total que está cargando la instalación eléctrica, solamente está realizando trabajo útil. Como habíamos dicho con anterioridad que la demanda activa no se podía sumar aritméticamente con la reactiva, no podemos decir en este caso que la demanda reactiva será 14% restante, sino que tenemos que calcularlo mediante ciertas relaciones denominadas trigonométricas. En este caso específico la demanda reactiva será 50% de la aparente.

### 1.4 Equipos consumidores de energía reactiva

Los equipos consumidores de energía reactiva se dividen en cuatro clases.

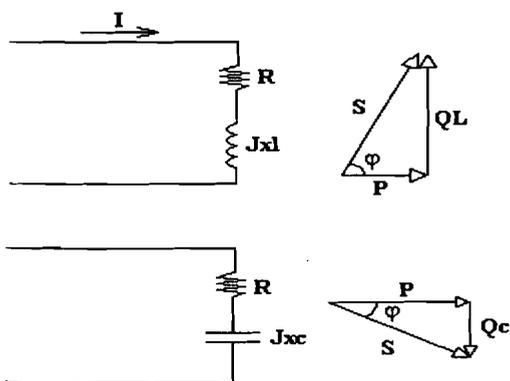
- A. Equipos que consumen fundamentalmente energía reactiva, como son las lámparas incandescentes, hornos por resistencia, planchas eléctricas y otros equipos que funcionan con resistencia pura.
- B. Equipos que consumen energía reactiva inductiva, como son los reactores de luz fluorescentes, bobinas de interruptores magnéticos de corriente alterna, bobinas, en general, conectadas a circuitos de corriente alterna.
- C. Equipos que consumen fundamentalmente energía reactiva capacitiva, como son los condensadores y equipos de gran capacitancia conectados a circuitos de corriente alterna.
- CH. Equipos que consumen los tres tipos de energía mencionadas anteriormente, o una combinación de las dos.

...en la práctica, por lo general, en las instalaciones de corriente alterna se encuentran los tres tipos de energía.

En el caso general (receptor real con resistencia ohmica e impedancia), el valor de la potencia será:

- Potencia aparente:  $S = V \cdot I = I^2 \cdot Z$
- Impedancia del circuito:  $Z = Z(\varphi) = R + jX$
- Factor de potencia del circuito:  $\cos \varphi = \frac{P}{S}$

En las figuras adjuntas, podemos ver una representación de las potencias requeridas para un circuito.



- S → Potencia aparente
- P → Potencia activa
- QL → Potencia reactiva(inductiva)
  
- S → Potencia aparente
- P → Potencia activa
- QC → Potencia reactiva(reactiva)

Fig. 5 y 6.

En general será:

$$S=V*I$$

$$P=V*I*\cos(\varphi)$$

$$Q=V*I*\sen(\varphi)$$

$$S^2=P^2+Q^2$$

S se mide en KVA

P se mide en KW

Q se mide en KVAR

La potencia activa es también llamada magnetizante, por ser la consumida en los circuitos magnéticos de las máquinas para crear el flujo, aunque no es consumida (solo las pérdidas), sino que es almacenada en el campo magnético para ser devuelta en la desconexión como ya sabemos.

Cada una de estas potencias requiere de la red una intensidad, siendo:

- Intensidad activa  $I_a$
- Intensidad reactiva  $I_r$

$$\text{Intensidad total en la red: } I_T = \sqrt{(I_a^2) + I_r^2}$$

### 1.5 Equipos consumidores de energía reactiva

El factor de potencia se define como la relación de la potencia activa (Kw) sobre la potencia aparente (KVA), es decir:

$$fp = \frac{P}{S} \quad (2.3)$$

Trigonométricamente.

$$fp = \cos \varphi = \frac{\text{Corriente activa}}{\text{Corriente total}} \quad (2.4)$$

el factor de potencia también puede definirse como el factor por el que se debe multiplicar la potencia aparente con el objetivo de obtener la potencia activa, por ejemplo, asumamos una carga en un sistema a 460 V trifásico. El amperímetro indica 200 A y el wattímetro 120 Kw.

¿Cuál es el factor de potencia de la carga?.

La potencia aparente para un circuito trifásico está dada por la siguiente expresión:

$$S = \frac{\sqrt{3} * U * I}{1000} \text{ KVA} \quad (2.5)$$

reemplazando datos:

$$S = \frac{\sqrt{3} * 460 * 200}{1000} = 159.2 \text{ KVA}$$

sustituyendo en la fórmula 2.3:

$$fp = 0.75 \text{ ó } 75\%$$

Usualmente el factor de potencia se expresa en porcentaje, pero dado que es una relación, se expresa mejor en forma decimal y se encuentra así en las fórmulas y tablas.

Las siguientes fórmulas se derivan de las fórmulas anteriores.

$$P = \frac{\sqrt{3} * U * I * fp}{1000} \text{ KW}$$

$$Q = \frac{\sqrt{3} * U * I * \sqrt{1 - fp^2}}{1000} \text{ KVAr}$$

$$\cos \varphi = \frac{Kw}{KVA} = fp$$

## 1.6 Generadores de KVAr.

Los capacitores tienen un factor de potencia en adelanto porque ellos pueden suministrar KVAr. Este factor de potencia en adelanto de los capacitores así como el factor de potencia unitario o en adelanto de los motores sincrónicos, pueden usarse en la elevación del factor de potencia de las cargas inductivas lo cual mejoraría el factor de potencia de la planta.

Los capacitores también pueden considerarse como generadores de KVAr porque pueden suministrar la corriente magnetizante de las cargas inductivas. Esto puede explicarse en términos de energía almacenada. Un capacitor instalado en el mismo circuito que un motor de inducción, tiene el efecto de un intercambio de energía reactiva entre ellos. La corriente en adelanto tomada por los capacitores, luego suministra la corriente en atraso requerido por el motor de inducción.

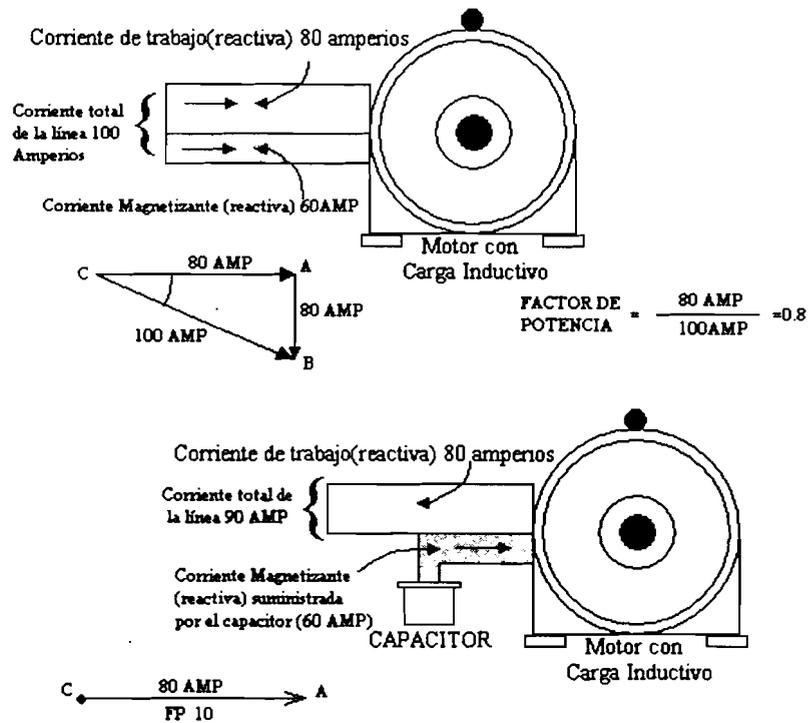


Fig. 7 A.- Con carga parcial, sin corrección del factor de potencia. B.- Capacitor instalado cerca del motor para suministrar la corriente magnetizante requerida

En la figura 7a, se puede apreciar un motor de inducción sin corrección del factor de potencia, el motor solo necesita 80 amperios para su carga de trabajo debido a los 60 amperios de la corriente magnetizante requeridos por el motor, el circuito tiene que conducir.

$$\sqrt{80^2 + 60^2} = 100 \text{ amperios}$$

El alimentador es cargado con la corriente de trabajo y también con la “corriente ociosa”, es decir con la corriente magnetizante, luego de instalar un capacitor que suministre los requerimientos magnetizantes del motor, como se muestra en la figura 7 b. El circuito de alimentación debe entregar solo 80 amperios para el mismo trabajo del motor, en este caso, el cable de alimentación solo conduce la corriente de trabajo. Como ya se dijo anteriormente, esto permite el empleo de más equipos eléctricos en el mismo circuito y reduce el costo de electricidad cuando existen penalidades por el factor de potencia o la energía reactiva.

### 1.7 Limitando los KW y los KVA.

Los generadores de turbinas y los motores-generadores (grupos electrógenos), tienen un límite de Kw para el motor y de KVA para el generador. Si el grupo está clasificado para operar a su valor nominal en Kw a un factor de potencia unitario, el límite en Kw corresponde a la capacidad en KVA del generador. Los grupos electrógenos por lo general operan en valores del factor de potencia que oscilan entre 0.8 y 1.0 y este rango está supeditado por ekl

factor de potencia y al capacidad en KVA del generador de tal manera que ni los Kw ni los KVA de la carga deben exceder la capacidad en KVA del generador.

Consecuentemente un mejoramiento del factor de potencia libera la capacidad tanto en Kw como en KVA. Mientras más alto sea el factor de potencia, menores serán los KVA de cualquier carga. Un factor de potencia significa menos KVA en instalaciones de generadores y transformadores y adicionalmente circuitos alimentadores principales y derivados más pequeños.

Mejorando el factor de potencia de 0.7 a 0.9, la corriente a través del circuito se reduce un 28% para los mismos KW de carga. El efecto aproximado de un factor de potencia en atraso a la salida de un generador convencional con factor de potencia de 0.8 puede verse en la figura 7.

El efecto de un factor de potencia en la capacidad de transporte de KW de los transformadores (clasificados por KVA), puede apreciarse en la figura 8.

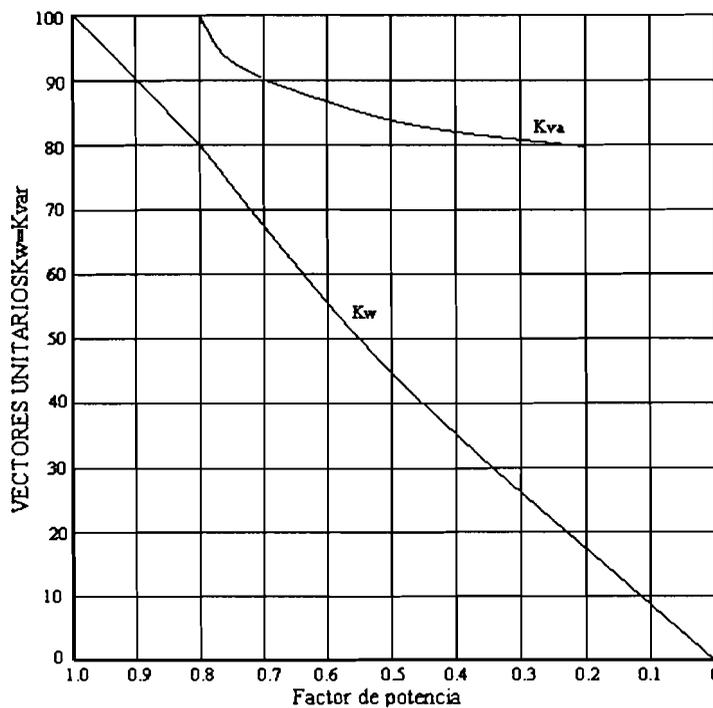


Fig. 8 Efecto del factor de potencia en los generadores de corriente alterna. (capacidad de entregar potencia).

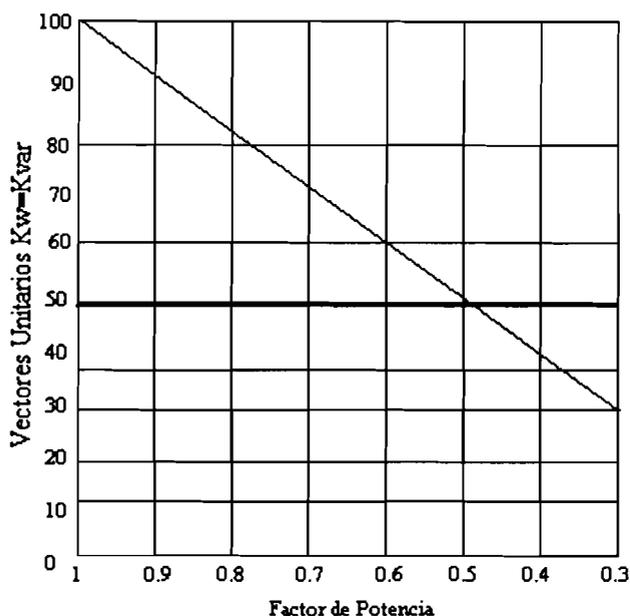


Fig. 9 Efecto del factor de potencia en el transporte de energía a través de transformadores (capacidad de transformar potencia).

Cada año, las plantas industriales gastan millones de dólares por una falta de conocimiento de los beneficios con el mejoramiento del factor de potencia.

Una observación a tomar en cuenta que generalmente no es económico ni necesario mejorar el factor de potencia exactamente a 1.0, ya que las cargas pueden variar durante el día y esto obligaría a estar variando continuamente la cantidad de capacitores conectados.

La cantidad exacta para mejorar el factor de potencia, depende de un factor de potencia original de un grupo de carga, de las variaciones de consumo durante el día y durante el año y de la estructura tarifaria de las empresas eléctricas. Cada uno de estos factores debe ser estudiados en forma individual antes de llegar a cualquier decisión. Una regla práctica que se emplea es mejorar el factor de potencia del sistema entre 0.9 y 0.95.

### 1.8 Como los capacitores mejoran el factor de potencia.

El uso de capacitores es el método más simple, común y económico para mejorar el factor de potencia de una planta industrial. Cuando están correctamente seleccionados, los capacitores suministran la corriente reactiva magnetizante y eliminan la corriente reactiva de la planta, lo que trae como consecuencia que se mejore el factor de potencia general. Los capacitores también mejoran la eficiencia de la planta, ampliando la capacidad eléctrica (KVA), incrementando el nivel de voltaje y reduciendo las pérdidas del sistema de tal manera que se puedan añadir cargas adicionales.

El uso de capacitores en el mejoramiento del factor de potencia es el mas económico ya que durante los últimos 20 años el costo, adquisición e instalación de los mismos ha disminuido en forma continua.

## 1.9 Tecnología de los capacitores.

### Introducción

El desarrollo tecnológico en la fabricación de los capacitores esta ligado al desarrollo de aislamientos líquidos y sólidos así como el surgimiento y empleo de nuevos materiales aislantes:

El papel KRAPT reemplazo al papel RAG desde 1949 en adelante.

El polipropileno reemplazo el uso de aceite mineral desde 1950, siendo reemplazado a su uso a partir de 1966 P.R. el film de polipropileno.

Actualmente los capacitores los capacitores son fabricados en unidades de pequeña potencia, lo cual posibilita su conexión en paralelo, trayendo como consecuencia que se puedan ensamblar baterías de capacitores de diversos tamaños y según la necesidad de cada lugar.

Desde 1950 hasta 1968, tanto en bajo como en medio voltaje, la técnica tradicional que se empleaba para la fabricación de capacitores se basaba en el papel CRAFT para aislamiento combinado con hojas de aluminio para las armaduras de metal y P.C.B (POLYCHLOBIPHENYL) como agente impregnante.

Durante este periodo el capacitor de papel metalizado impregnado apareció pero con aplicaciones de bajo voltaje(menos de 1000v). Las armaduras del capacitor no eran de hojas de aluminio, sino de metal depositado en vacío sobre el papel.

Con el surgimiento del polipropileno los fabricantes reemplazaron ciertas hojas de papel por una película de este material.

Las principales ventajas de este condensador "MIXTO"(papel y plástico todo impregnado) son:

- Una considerable reducción en las perdidas del dieléctrico, lo que trajo como consecuencia de la fabricación de unidades de mayor capacidad de potencia.

- Un incremento en el gradiente operativo debido a una reducción en el volumen y peso para una misma potencia.

Durante el periodo de 1972 a 1978, las restricciones en el empleo del P.C.R en el mundo básicamente por motivos geológicos quisieron que los fabricantes de capacitores, desarrollaran nuevos productos impregnantes.

Durante el mismo periodo apareció el polipropileno metalizado en vacío y revoluciono la técnica empleada en la construcción de capacitores de bajo voltaje.

## 1.10 Factores que influyen en elección y empleo e instalación de los capacitores.

### 1.10.1 Especificaciones y métodos de prueba.

#### 1.10.1.1 Capacitancia.

Es el valor del capacitor medido a  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

#### 1.10.1.2. Tolerancia.

La máxima desviación del valor nominal de la capacitancia medida a  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . En ciertos casos, los capacitores tienen un código de colores para el rango de tolerancia, a los efectos de permitir un arreglo mejor entre el capacitor y otros del circuito.

#### 1.10.1.3. Variación de la capacitancia con la temperatura

La capacitancia puede variar de valor respecto al valor medido a  $25^{\circ}\text{C}$ , dentro de un rango que especifica el fabricantes.

En las figuras 10 y 11 se pueden observar curvas típicas de la capacitancia en función de la temperatura.

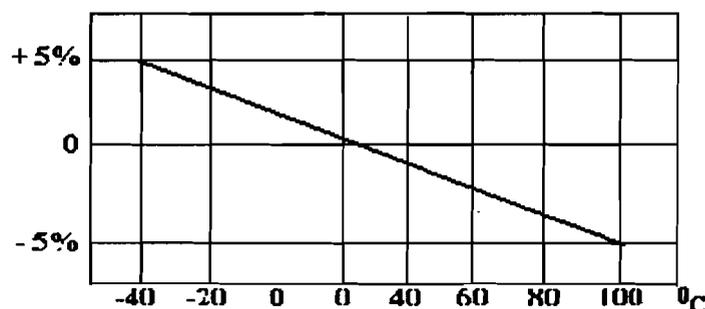


Fig. 10 Polipropileno metalizado

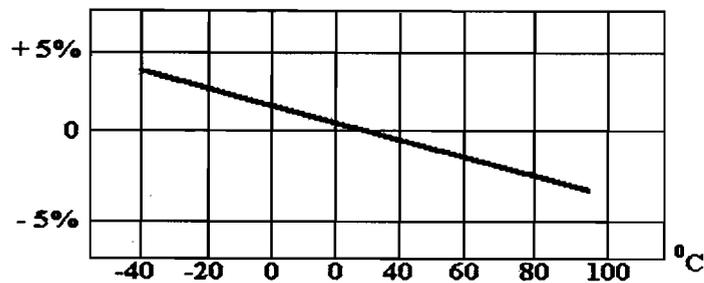


Fig. 11 Polipropileno metalizado

#### 1.10.1.4. Corriente de fuga.

Es la corriente entre la bobina del capacitor y el envase, para condensadores de 220 a 240 V, las condiciones de prueba pueden ser las siguientes.

- 230 V a 60 Hz aplicado entre los terminales del capacitor (eléctricamente unidos) y el envase.
- 230 V a 60 Hz aplicado entre los terminales del capacitor y el envase, la corriente es medida entre el terminal escogido y el envase.

#### 1.10.1.5. Voltaje nominal.

El voltaje nominal está dado por un valor de A.C. o por un valor de pico.

- valor nominal en A.C.. Es el valor RMS de un voltaje senoidal de 60 Hz, al cual el capacitor cumplirá con su vida de operación, si los demás requerimientos especificados son cumplidos.
- voltaje nominal pico. Es el voltaje máximo de pico, repetitivo, que puede ser aplicado al capacitor en cada polaridad. Cuando los picos negativos y positivos son iguales, el voltaje pico será igual a la mitad del valor pico a pico.

La aplicación de valores mayores que el voltaje de pico nominal, puede dar lugar a fallas prematuras en el dieléctrico.

#### 1.10.1.6. Frecuencia.

Los capacitores para A.C. son, usualmente para una frecuencia nominal de 60 Hz y pueden ser usados a frecuencias menores sin problema alguno, por ejemplo 50 Hz sin reducción de su vida de operación.

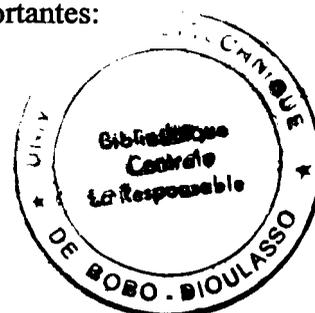
Los capacitores pueden ser operados a frecuencias mayores o con voltajes no sinusoidales, pero no es necesario aplicar los factores de corrección adecuados para preservar la vida del capacitor.

La operación a frecuencias mayores, sin hacer las correcciones necesarias para su selección dará lugar a una temperatura excesiva en el dieléctrico y a la probabilidad de fallas prematuras.

#### 1.10.1.7. Temperatura de operación.

En la aplicación de capacitores hay tres temperaturas que son importantes:

- Temperatura ambiente.
- Temperatura del punto más caliente del envase.
- Temperatura del punto más caliente del dieléctrico.



#### Temperatura ambiente.

Es la temperatura del aire en la cercanía inmediata de un capacitor, por ejemplo a una distancia de una pulga o menos de la superficie del capacitor.

#### Temperatura del punto más caliente del envase.

La temperatura más alta de un "Punto" sobre la superficie del envase bajo condiciones de operación este "punto" estará situado usualmente en la cara plana de los envases ovales y sobre la cara mayor en los rectangulares y a 2 / 3 de la parte inferior del envase.

#### Temperatura del punto más caliente del dieléctrico.

La temperatura más alta de un "punto" en el interior del capacitor, estará localizada en la mayoría de los casos, en las cercanías del centro de la bobina del capacitor.

Esta temperatura es la que tiene un efecto más directo en la vida de la humedad. Desafortunadamente no es medible fácilmente. Los otros límites especificados son escogidos para asegurar que esta temperatura se mantenga dentro de límites aceptables.

#### 1.10.1.8. Temperatura de almacenamiento.

Es el rango de temperatura dentro del cual se pueden almacenar un capacitor, desenergizado, sin que ocurra una degradación en el dieléctrico.

donde

#### 1.10.1.9. Factor de disipación.

Todos los capacitores tienen ciertos componentes resistivos asociados con ellos debido a la resistividad de los electrodos las conexiones internas y también debido a pérdidas dieléctricas.

El total de estos componentes es algunas veces referido como una resistencia equivalente (R S E) el factor de disipación está definido matemáticamente como la tangente del ángulo ( $\theta$ )

formado entre la reactancia  $X_c$  y la impedancia  $Z_c$  del capacitor. Obviamente, cuando más pequeño sea el ángulo ( $\partial$ ), más se acercará el capacitor a ser perfecto.

Factor de disipación =  $\tan \partial$ .

$$\tan \partial = \frac{R_c}{X_c}$$

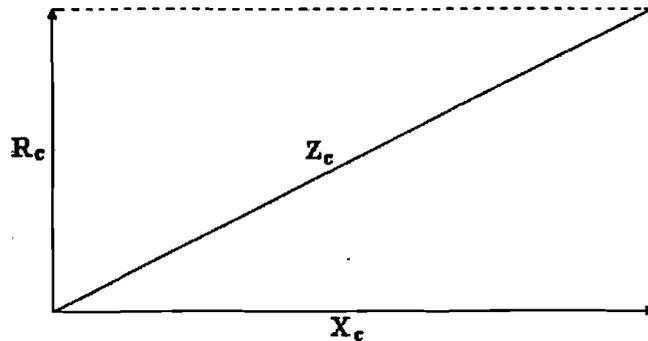


Fig. 12

Los VAR solicitados por el capacitor están dados por.

$$VAr = I^2 \cdot X_c$$

y los watts de pérdidas:

$$V.A. \cdot \tan \partial = I^2 \cdot \frac{R_c}{\tan \partial} \cdot \tan \partial = I^2 \cdot R_c$$

El término  $I^2 \cdot R_c$  es empleado, también, para describir las pérdidas en el capacitor.

En el caso de una forma de onda de voltaje senoidal, los VAR están dados por.

$$VAr = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot V^2$$

$$C = K \cdot (K.A) / T$$

donde:

Y para una forma de onda de voltaje no senoidal la expresión es:

$$VA = 2pC(f_1 V_1^2 + f_2 V_2^2)$$

donde:

$f_1, f_2$  – son frecuencias de las componentes armónicas.

$V_1, V_2$  – son sus amplitudes.

A – área de los electrodos.

T – espesor del dieléctrico.

K – constante física.

Es importante remarcar que la frecuencia tiene un efecto directo sobre las pérdidas técnicas de un capacitor. En las figuras 12 y 13 se puede apreciar las curvas típicas del factor de disipación para diferentes sistemas dieléctricos.

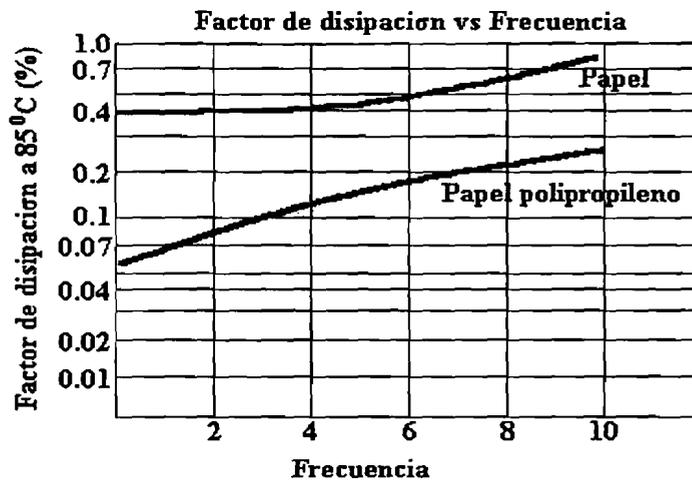


Fig. 13

### 1.10.2. Vida de operación.

La vida de un capacitor bajo las condiciones normales de operación es expresada como un número de horas de trabajo con un porcentaje de capacitores aún en operación después de este tiempo, por ejemplo: 60 000 horas con una sobre vida del 94%.

La naturaleza de estos capacitores es tal, que ellos se deterioran después de un período del tiempo de utilización, por tanto se deben tomar precauciones en la aplicación de los capacitores para que en el área más extensa de fallas este bien alejados de la vida del equipo al cual estén asociados.

La temperatura y el voltaje son los factores que más afectan la vida de un capacitor. La operación a temperaturas o voltajes excesivos no resultarán, probablemente, en una falla inmediata, pero se irán reduciendo la vida útil del capacitor.

Las figuras 14 y 15 muestran la relación entre las expectativas de vida y la temperatura y el voltaje de trabajo respectivamente.

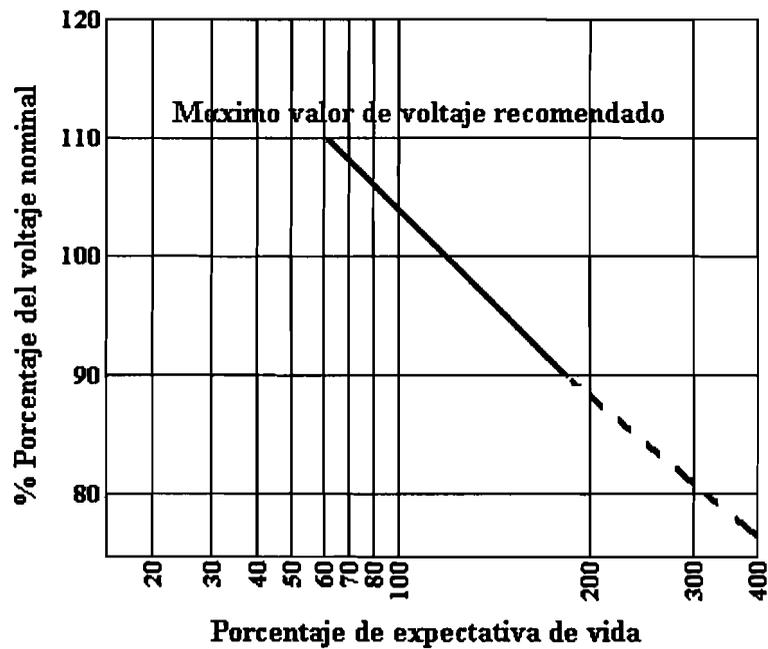


Fig. 14

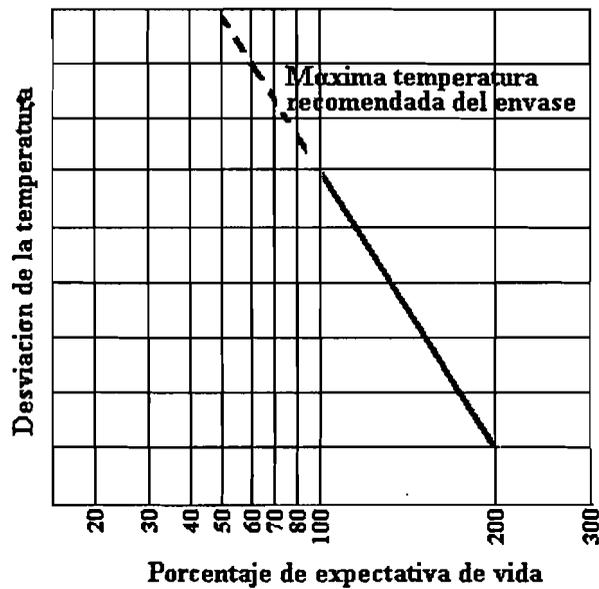


Fig. 15

## 1.11. Tipos de capacitores que se encuentran en el mercado.

### 1.11.1. Capacitores de papel.

Estos capacitores son diseñados para ser empleados en motores, iluminación, aire acondicionado y fuentes de A.C.. Tiene un sistema dieléctrico de papel.

#### Especificaciones:

Capacidad:	1 $\mu$ F a 20 $\mu$ F
Tolerancia	+/- 10 %
Capacitancia	+/- 6 % (código de colores en cuatro rangos de 3 %)
Variación de	

la capacitancia	+/- 6 % entre -55 °C a 85 °C	
Voltaje	hasta 500 V A.C.	
Corriente de fuga capacitancia		Corriente de fuga máxima
0 - 14 mF		60 mA
15 - 20 mF		70 mA
21 - 50 mF		100 mA
Frecuencia	60 Hz nominal	
Temperatura de operación	-40 °C a +70 °C en el envase tipo D. -40 °C a +85 °C en el envase tipo K.	
Temperatura de almacenamiento.	-55 °C a +90 °C en el ambiente.	
Vida de operación	60 000 horas con 94 % de sobrevida (D) 60 000 horas con 90 % de sobrevida (K)	
Factor de disipación.	0.6 % máximo	
Resistencia de descarga interna.		

### 1.11.2. Capacitores de papel polipropileno.

Estos capacitores son diseñados para ser usados en filtros de A.C., circuitos ferresonantes, computadoras, iluminación, etc. Tiene un sistema dieléctrico compuesto de polipropileno papel código penal terminales insertados.

#### Especificaciones.

Capacitancia	5 μF a 20 μF	
Tolerancia en capacitancia	+/- 10 % +/- 6 % ( código de colores cuatro bandas 3 %)	
Variación de la capacitancia con la temperatura	+/- 5 % entre 5°C a +/- 70 °C	
Voltaje	400 a 800 V	
Corriente de fuga capacitancia		Corriente de fuga máxima
0 - 14 mF		60 mA
15 - 20 mF		70 mA
21 - 60 mF		100 mA
Frecuencia	60 Hz nominal	
Temperatura de operación	-45 °C a +70 °C en el envase tipo D.	

Temperatura de almacenamiento.	-55 °C a + 90 °C en el ambiente.
Vida de operación	60 000 horas con 94 % de sobrevida (D) 60 000 horas con 90 % de sobrevida (K)
Factor de disipación.	0.3 % máximo
Protección interna	Interruptor sensible a la presión
Resistencia de la descarga interna.	

### 1.11.3. Capacitores de polipropileno metalizado.

Estos capacitores son diseñados para ser usados en motores, iluminación, fuentes A.C, computadoras, etc. Las bajas pérdidas dieléctricas, su propiedad de autoregeneración y la alta relación de microfaradios por unidad de volumen hacen sus diseños ideales donde la confiabilidad y tamaño son esenciales. Estos capacitores son recomendados para nuevas aplicaciones donde se usaban, tradicionalmente, capacitores de papel.

#### Especificaciones.

Capacitancia	1 $\mu$ F a 90 $\mu$ F
Tolerancia en capacitancia	+/- 10 %
Voltaje	hasta 400 V A.C.
Corriente de fuga	30 mA
Frecuencia	60 Hz nominal
Temperatura de operación	-45 °C a +70 ° C. -40 °C a +80 ° C
Temperatura de almacenamiento.	-40 °C a + 90 °C
Vida de operación	60 000 horas con 94 % de sobrevida
Factor de disipación.	0.1 % máximo
Protección interna	Interruptor sensible a la presión
Variación de la capacidad con la temperatura.	+/- 5 % entre -40 °C a +70 ° C

# Capítulo III

## CAPITULO II Influencia de un alto y bajo factor de potencia.

### 2.1 Necesidad de la mejora del factor de potencia en una instalación.

Existen diversas causas por las que es indispensable, al proyectar una instalación, diseñarla con equipos adecuados para que el factor de potencia sea lo más próximo posible a la unidad.

Si la instalación es existente, es aconsejable por estas mismas causas, instalar los equipos adecuados para mejorar el factor de potencia; las causas generales son:

a) De funcionamiento de la instalación: ya hemos visto que la intensidad total demandada a la red es superior a la intensidad activa, este exceso, puede ser eliminado, con lo que descargaremos el transformador y las redes, evitando sobrecalentamiento de los circuitos y aumentando la capacidad de transporte.

b) Motivos económicos al proyectar la instalación: al disminuir la intensidad que realmente circula, tendremos las siguientes ventajas:

- Mayor vida media de la instalación.
- Menor costo, pues podremos recurrir a menores secciones de los conductores.
- Menor potencia aparente en los transformadores, abaratando sustancialmente la inversión inicial.

Como ejemplo aclarativo, planteamos la siguiente cuestión: ¿Qué transformador necesitará una industria, que tiene instalada entre motores y lámparas de descarga, una potencia de 225 Kw, factor de potencia 0.55? y si corregimos el factor de potencia a 0.91, ¿qué transformador será necesario?

En el primer caso,  $(S = \frac{225}{0.55} = 409.1KVA)$ , no sería suficiente un transformador de 400

KVA, tendríamos que recurrir al modelo comercial superior de 500 KVA.

En el segundo caso,  $(S = \frac{225}{0.91} = 247.25KVA)$ , sería suficiente un transformador de 250

KVA, de precio inferior al anterior y menos requerimientos de espacio en el centro.

Análogamente ocurriría con las líneas de alimentación; en el primer caso, tendríamos que transportar una intensidad de  $I = (\frac{225000}{1.73 * 380 * 0.55} = 622.33A)$ . En el segundo caso,

$I = (\frac{225000}{1.73 * 380 * 0.91} = 376.1A)$ .

Pudiendo ser la sección del conductor muy inferior y en consecuencia, más económico.

c) Motivos económicos en el funcionamiento: durante el funcionamiento de la instalación, serán dos los motivos de la economía.

- Coste del mantenimiento y recuperación, ya que si es necesario sustituir un conductor, así como otros elementos, será más económico por ser de menor sección como ya indicamos, además, según señalamos anteriormente, al sufrir menor calentamiento, sería de vida más larga.

Coste del KWh pagado a la compañía suministradora a este respecto, estudiaremos un recibo de energía eléctrica: Supongamos que se trata de una empresa que tiene contratada una potencia de (X) KW, a la que le corresponde un tarifa general.

- Cuota de potencia, por KW contratado por mes.
- Cuota de consumo o término de energía que tendrá por valor en pesos, el producto de la diferencia de lectura del contador (KWh consumidos según las tarifas vigentes).
- Término de energía reactiva, análogo al anterior, diferencias de lecturas, por precio del KWh.
- Otros rasgos y conceptos. Puntos, alquiler de equipos de medida, I.V.A., etc.

Con respecto al término de energía reactiva, debemos señalar que si el factor de potencia es muy bajo, por ejemplo 0.6 por cada KVA tendremos:

Potencia aparente	1 KVA
Potencia activa	0.6 KW
Potencia reactiva	0.8 KVAr

Pudiendo en consecuencia ser muy elevado su coste

## 2.2 Importancia de tener el factor de potencia alto.

Ya hemos estudiado las distintas demandas que se producen en un sistemas de energía alimentado por corriente alterna, así como las relaciones que existen entre los diferentes parámetros. De todos, el más importante y que más se controla es el factor de potencia, ya que este es el parámetro que mejor refleja el grado de utilización real de la demanda aparente. Algunas veces se toma la demanda reactiva como indicador de esta utilización.

En la figura 1 se muestra el efecto del ángulo entre la demanda aparente y la demanda real. Podemos apreciar que la demanda aparente será mayor, mientras mayor sea el ángulo existente entre la demanda real y la aparente. Como se puede apreciar en la figura, la relación  $KW/KVA_1$  es mayor (más cercano a la unidad) que la relación  $KW/KVA_2$ . Note que el ángulo  $\varphi_2$  es mayor que el ángulo  $\varphi_1$ . Por lo tanto, mientras mayor sea el ángulo entre la demanda real y la aparente, mayor será la corriente que fluye por los conductores para servir la misma cantidad del KW al consumidor. De manera que: una misma demanda en KW, puede servirse a una industria con más o menos corriente, en dependencia del valor del ángulo y por lo tanto, del factor de potencia, ya que  $KVA = \frac{KW}{F.P}$ .

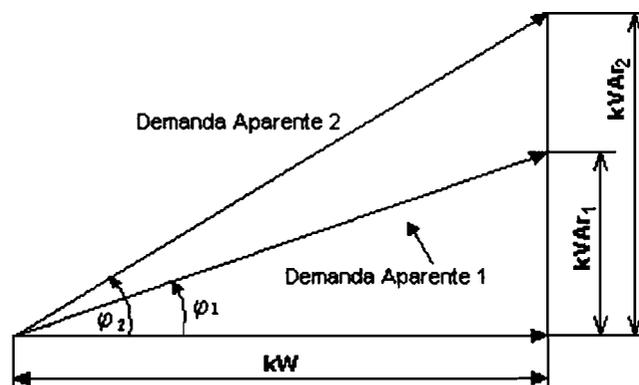


Fig. 1 Reducción de la demanda aparente mediante la reducción del ángulo  $\varphi$ , manteniendo la potencia real invariable.

De lo anteriormente expuesto se deduce que debemos tratar de servir una demanda determinada con la menor corriente total posible, o sea, o con el ángulo más pequeño posible. ¿Qué efecto tiene esto, en general?.

a) Es beneficioso para la industria porque al reducirse el valor de la corriente total, se libera capacidad de los conductores y transformadores, lo cual permite adicionar nuevas cargas sin necesidad de aumentar el calibre de los conductores, la capacidad de los conductores, o la capacidad del banco de transformadores.

b) Es beneficioso para el sistema electroenergético nacional porque al reducirse las corrientes por las líneas, se reducen las pérdidas y se libera capacidad de las subestaciones de transmisión y distribución.

c) Es beneficioso, además, porque se reduce el valor de la caída de voltaje en las instalaciones.

¿Cuanta capacidad se libera?

Supongamos que la demanda real en Kw se mantiene invariable. En este caso, según la relación:

Si despejamos la ecuación anterior tenemos

$$KVA_2 = \frac{fp_1}{fp_2} \cdot KVA_1 \tag{2.2}$$

Ejemplo:

Un consumidor tiene una demanda aparente de 150 KVA y un factor de potencia de 0,75. Se mejora el factor de potencia a 0,9 y se quiere saber que capacidad se libera por motivo de esto. Los KVA después de mejorado el factor de potencia.

$$KVA_2 = \frac{0,75}{0,9} \cdot 150 = 125 \text{ KVA}$$

o sea, obtenemos una rebaja de 25 KVA, lo expuesto es cierto siempre que la nueva carga que halla que agregar tenga el mismo factor de potencia de la carga sin corregir, veamos que sucede cuando esto no es de esta manera.

En caso de que el factor de potencia de la nueva carga no sea igual al de la carga sin corregir, tenemos que auxiliarnos del gráfico de la figura 2: para determinar la capacidad adicional que queremos agregar.

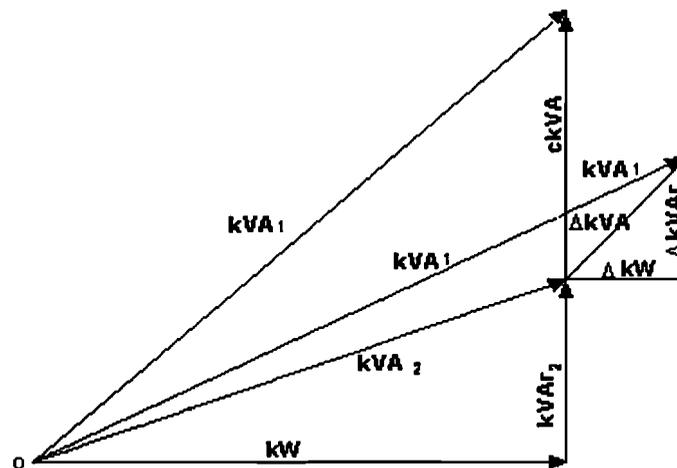


Fig. 2 Diagrama vertical para determinar la potencia aparente que podemos conectar mediante la compensación capacitiva manteniendo la potencia aparenta invariable.

Se construye el triángulo original de potencia donde se sitúan la demanda activa, reactiva y aparente. Se construye otro triángulo con los incrementos de demanda activa y reactiva que se quiere adicionar, de manera que uno de sus vértices se sitúe sobre el cálculo que se traza, para lo cual se toma centro en el punto O, y como radio los KVA originales, que se supone

El otro vértice del triángulo de los incrementos se coloca sobre la perpendicular del triángulo original, correspondiente a los KVA reactivos. La distancia 1-2 será la cantidad necesaria de KVA capacitivo que hay que conectar en el sistema de manera que al agregar la nueva carga, sumando vectorialmente  $KVA_1 + KVA$ , la carga resultante sea igual a la original,  $KVA_1$ . Si utilizamos una escala apropiada podemos seleccionar gráficamente el problema, pero por lo general la solución se obtiene al aplicar la relación: brinda una exactitud aceptable, ya que el factor de potencia real de las cargas inductivas se encuentran entre 0,7 y 0,8.

$$\Delta KW = KW_1 \left( \frac{fp_2}{fp_1} - 1 \right) \quad (2.3)$$

¿Cómo se reducen las pérdidas?

Las pérdidas en un conductor cualquiera se calcula multiplicando el cuadrado de la corriente que fluye por él, por la resistencia del conductor, indicaremos las pérdidas como  $P_w$ .

De acuerdo con lo escrito anteriormente:

$$P_{w1} = I_1^2 \cdot R \quad (2.4)$$

$$P_{w2} = I_2^2 \cdot R \quad (2.5)$$

Si dividimos ambas expresiones obtenemos:

$$\frac{P_{w1}}{P_{w2}} = \frac{I_1^2}{I_2^2} = \left( \frac{I_1}{I_2} \right)^2 \quad (2.6)$$

si se multiplica el numerador y el denominador por 1,73 volt, la relación anterior puede escribirse de la forma siguiente:

$$\frac{P_{w1}}{P_{w2}} = \frac{KVA_1^2}{KVA_2^2} \quad (2.7)$$

Como ambas relaciones son equivalentes, podemos utilizar la que más nos convenga. Cuando tomamos el ejemplo anterior, podemos calcular la relación obtenida en pérdidas, con respecto a los valores siguientes:

$$KVA_1 = 150$$

$$KVA_2 = 125$$

$$\frac{P_{w1}}{P_{w2}} = \left( \frac{150}{125} \right)^2$$

de aquí

$$P_{w_2} = \left(\frac{125}{150}\right)^2 \cdot P_{w_1}$$

Al aplicar las relaciones  $\cos \varphi = \frac{KW}{KVA}$  y  $\frac{P_{w_1}}{P_{w_2}} = \frac{KVA_1^2}{KVA_2^2}$  obtenemos la expresión siguiente:

$$\frac{P_{w_1}}{P_{w_2}} = \frac{fp_1^2}{fp_2^2} \tag{2.8}$$

Si empleamos los valores del factor de potencia del ejemplo que estamos tratando, tenemos que las pérdidas se reducen de la forma siguiente:

$$P_{w_2} = \left(\frac{0,75}{0,90}\right)^2 \cdot P_{w_1} \tag{2.9}$$

$$P_{w_2} = 0,696 \cdot P_{w_1}$$

Es decir, la corrección del factor de potencia de 0,75 a 0,9 reduce las pérdidas en aproximadamente 30% de las originales.

¿Cómo se reduce la caída de voltaje?

La caída de voltaje aproximada en una línea está dada por la expresión:

$$\Delta V = I \cdot R \cdot \cos \varphi + I \cdot X_1 \cdot \sin \varphi \tag{2.10}$$

donde:

- I – intensidad de la corriente.
- R – resistencia del conductor.
- X<sub>1</sub> – reactancia inductiva de la línea.

Como al mejorar el factor de potencia de la línea, disminuye el ángulo de desfase entre la corriente y el voltaje, y disminuye además la corriente total, ambos factores inciden en la disminución de la caída de voltaje.

De lo expuesto anteriormente podemos llegar a las conclusiones siguientes:

1. Los KVA de carga se reducen o se aumentan proporcionalmente con el cociente de los factores de potencia, antes y después de la corrección. El factor de potencia aumenta de valor, manteniéndose invariable los KW de la demanda, habrá reducción de corriente, y por consiguiente de la demanda de KVA. Si por el contrario, disminuye su valor, aumenta la demanda aparente.

2. La pérdida en los conductores varía en forma proporcional por el cuadrado del factor de potencia antes y después de la corrección.

3. Disminuye la caída de voltaje.

Si tomamos el ejemplo anterior vamos a ver que cuando se mejora el factor de potencia de 0,75 a 0,9, es decir, de 7% se obtiene el mismo tanto por ciento de reducción en la demanda aparente, y además, una reducción de casi 30 % en la pérdida de los conductores.

De todo lo expuesto se deduce la importancia de mejorar y controlar el factor de potencia.

### **2.3 Tipos de compensación según la ubicación de los capacitores.**

Existen tres formas básicas de compensar la potencia reactiva, dependiendo de la ubicación de los capacitores respecto a las cargas: compensación individual, compensación por grupo y compensación central.

#### **Compensación individual.**

Este tipo de compensación se emplea básicamente donde hay instalados motores de gran potencia y pretende no sobredimensionar el cable de alimentación o permite ampliar la capacidad de la línea cuando se requiere aplicar nuevas cargas. La corrección del factor de potencia en este último caso, puede eliminar la necesidad de recablear la línea.

Las ventajas que se obtienen con este tipo de compensación son las siguientes:

a) Disminución de la caída de tensión en el cable de alimentación de los motores. Reducción de las pérdidas por calentamiento en la línea.

b) Los capacitores se pueden conectar y desconectar del servicio según se requiera. De esta manera el factor de potencia se ajusta a cualquier tipo de carga y se obtiene una mejor regulación en el voltaje.

c) La capacidad de los capacitores requeridos en motores individuales se obtiene directamente de las tablas del fabricante sin necesidad de cálculos especiales.

d) Tanto en el caso de motores o para cualquier máquina de inducción compensada de esta manera, existe la flexibilidad de la instalación en caso de cambio de ubicación dentro de la planta. No interesa el lugar donde se traslade el motor, siempre tendrá garantizado su corrección del factor de potencia.

La principal desventaja de esta compensación es el elevado costo. El costo de instalación de capacitores por KVAR es inversamente proporcional a la potencia reactiva, es decir, es más económico instalar un solo banco de capacitores de mayor potencia que varios bancos de compensación individual para una misma cantidad de KVAR totales.

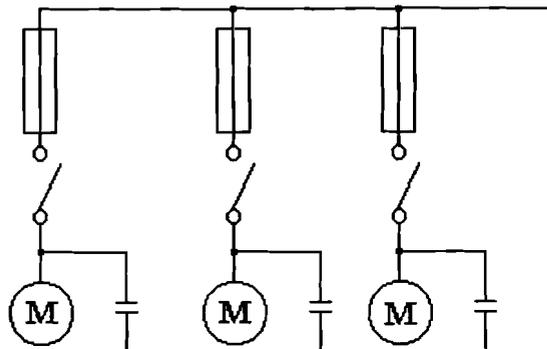


Fig. 3 Compensación individual.

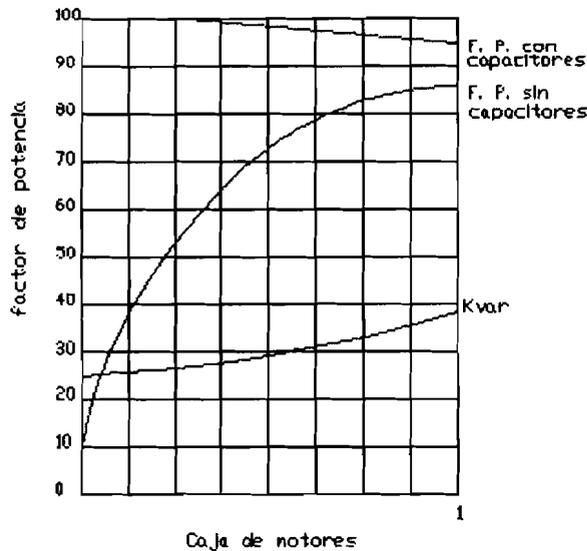


Fig. 4 Incremento del factor de potencia de motores eléctricos usando compensación individual y trabajando a diversos porcentajes de carga.

Como recomendación práctica se debe indicar que para motores de inducción la potencia del condensador no debe sobrepasar el 90% de la potencia reactiva del motor trabajando en vacío. En caso de excederse este valor, puede autoexcitarse el motor al desconectar la fuente principal, causando elevadas sobretensiones en los bornes. Se recomienda que la potencia del condensador sea aproximadamente el 35% de la potencia nominal del motor.

Los motores que trabajan bajo un régimen de múltiples arranques y paradas, por ejemplo las punzonadoras, motores de multivelocidad o motores de accionamientos rápidos, requieren que el condensador sea instalado al costado de la carga con su propio equipo de accionamiento y protección como se puede apreciar en la figura 5 b y c.

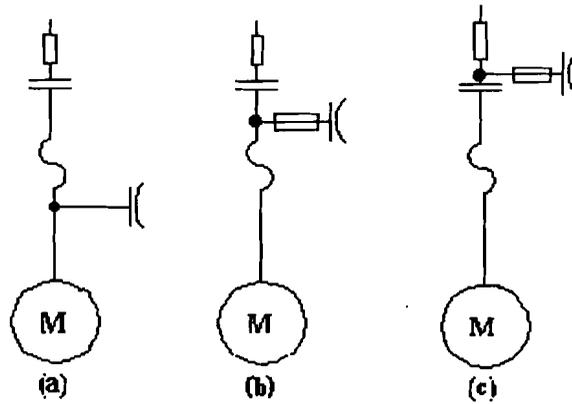


Fig. 5 Instalaciones típicas de condensadores en motores eléctricos.

Se debe resaltar que la compensación individual también se emplea para compensar transformadores de alta tensión a baja tensión (AT/BT), en este caso se recomienda dimensionar los capacitores para el consumo de potencia reactiva del transformador a plena carga (ver tabla 1). Si la corrección del factor de potencia se realiza por medio de un condensador fijo conectado al transformador, se deben tomar las precauciones para no sobrecompensar (factor de potencia en adelanto) durante el servicio con cargas parciales.

Tabla 1 Relación entre la potencia de condensadores y potencia nominal de transformadores

Potencia nominal aparente $S_n$ del transformador (KVA)	Potencia reactiva Q en vacío (KVAr)	Potencia reactiva Q a plena carga (KVAr)	Potencia de condensadores recomendada $Q_c$ (KVAr)
100	2.1	3.4	4
160	2.5	5.6	6
250	4.2	14.3	15
400	6.6	23.1	25
630	9.5	36.6	40
1000	13	58.5	60
1600	22	83.8	100

**Compensación por grupos.**

En este caso, el capacitor compensa una cierta cantidad de motores o lámparas fluorescentes que se conectan en grupo por medio de un contactor o interruptor (figura 6) no se requieren interruptores individuales para conectar los condensadores.

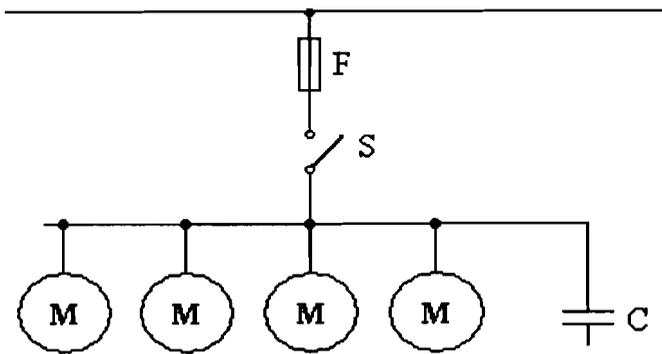


Fig. 6 Compensación en grupo.

Las principales ventajas son:

a) Las baterías de capacitores tienen costos más bajos por KVAR que los capacitores individuales.

b) El costo de instalación de una batería de capacitores es más bajo por KVAR que el costo de instalación de capacitores individuales para cada motor como se puede apreciar en la figura 7.

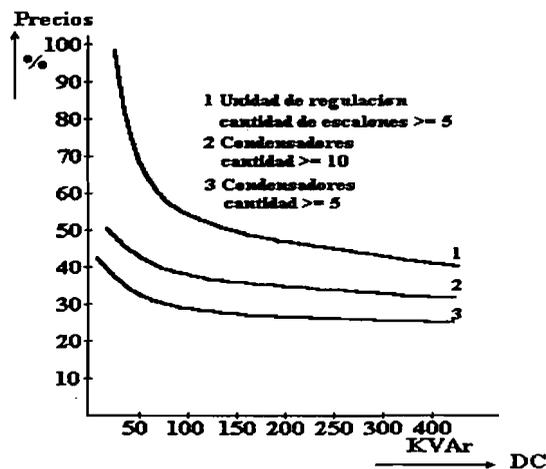


Fig. 7

### Compensación central.

También conocida como instalación híbrida. Es una combinación de los dos métodos de compensación vistos anteriormente.

Los mejores resultados de compensación se obtienen mediante el empleo de bancos de capacitores híbridos (mixtos) y/o bancos automáticos con compensación individual en los motores de potencia elevada por ejemplo analicemos el caso mostrado en la figura 8. las cargas de iluminación (8 a) operan de forma continua, por lo que se recomienda agruparlas e instalarles un banco de condensadores. Los capacitores para los motores de gran potencia (8 b)

son conectados individualmente y accionados con la carga. Para los motores de menor potencia (8 c), se recomienda realizar compensación por grupos.

La principal ventaja de este tipo de compensación es que mejora el factor de potencia general de la planta, reduciendo así el gasto mensual de energía eléctrica.

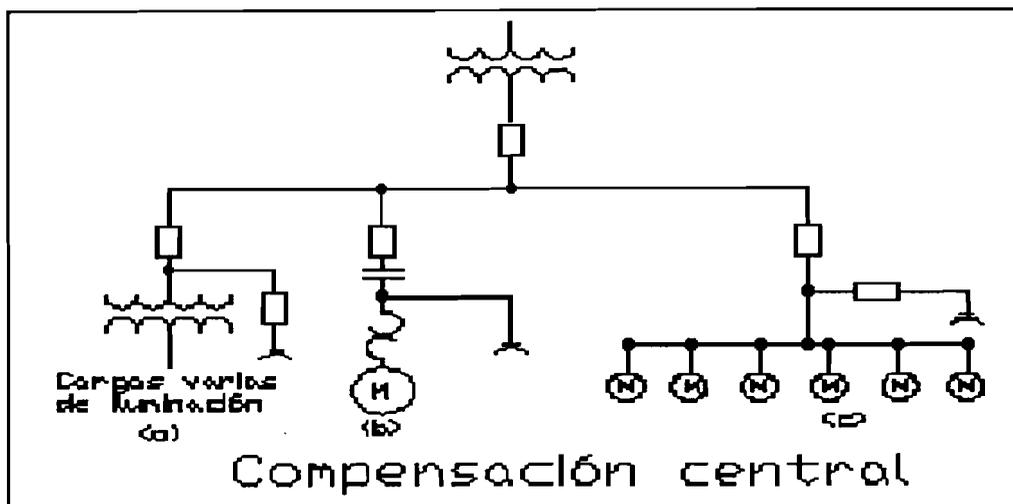


Fig. 8

**Consideraciones generales para la instalación de capacitores industriales.**

Las reglas principales que se deben tener en cuenta en una instalación, se puede resumir como siguen:

a) Todas las partes vivas deben estar encerradas y la caja de metal que contiene el banco de capacitores deben estar conectadas a tierra.

b) Respecto a los conductores:

- Capacidad de corriente: la capacidad de corriente de los conductores de los circuitos de capacitores no deberá ser menor al 135% de la corriente nominal del capacitor. La capacidad de corriente de los conductores que conectan un capacitor a los terminales de un motor o a los conductores del circuito de un motor no deberá ser inferior a una tercera parte de la capacidad de corriente de los conductores del circuito del motor, y al mismo tiempo no deberá ser menor que el 135% de la corriente nominal del capacitor.

- Protección contra cortocircuito:

- Cada conductor activo deberá estar previsto de un dispositivo de desconexión, excepto cuando el condensador esté conectado en el lado de carga del dispositivo de protección contra sobrecarga del motor en marcha.

- La capacidad de corriente nominal del dispositivo de desconexión no deberá ser inferior al 135% de la corriente nominal del condensador.

□ Las tablas 1, 2 y 3 del anexo, muestran la corriente de los fusibles y los circuitos circuit Breakers (interruptor termomagnético) para diversas potencias de capacitores en función del voltaje según el National Electrical Code de Estados Unidos (NEC) artículo 460-8a.

c) Para preservar la longevidad de los contactores y capacitores, es necesario limitar las corrientes de conexión, esta limitación se efectúa por medio de una inductancia sobre el cable que conecta el contador al juego de barras como se puede apreciar en la figura 9.

- Contactor previsto para la maniobra de los capacitores: la inductancia se efectuará mediante 0.90 m de cable haciendo una espira.

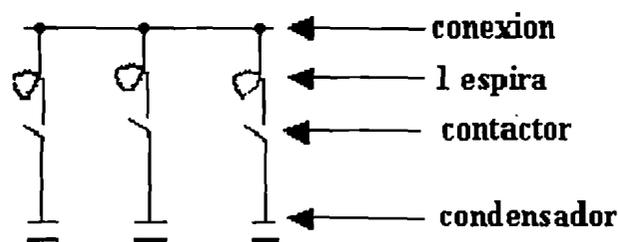


Fig. 9

- Contactor no previsto para la maniobra de los capacitores: la inductancia se efectuará mediante 0.90 m de cobre, haciendo 5 espiras de 14 cm de diámetro sobre el cable que conecta el contactor al juego de barras.

d) La potencia reactiva total en KVA<sub>r</sub> de todos los capacitores no deberá exceder en ningún caso del 74% de la potencia aparente del transformador en KVA.

e) Para el mantenimiento preventivo debe considerarse los siguientes puntos:

- Evitar la acumulación de polvo y la suciedad.
- Verificar el ajuste de los bornes.
- Verificar periódicamente el estado de los aparatos de mando y protección.

# Capítulo III

## CAPITULO III Métodos de mejoramiento del factor de potencia.

### 3.1 Cálculo de un banco de capacitores.

Existen diversas maneras de calcular un banco de capacitores, siendo 4 las más difundidas:

- Por facturación de las empresas eléctricas y que se emplea para bancos de capacitores menores de 100 KVAR, como compensación central con bancos fijos. También se utiliza para verificar los resultados que se puedan obtener mediante cualquier otro método.
- Mediante tablas. Este método se emplea para compensación individual y para un chequeo general del banco de capacitores mediante cualquier otro método.
- Estudio de energía, mediante el empleo de un vámetro registrador (equipo que mide los Varh consumidos) o con un equipo de medición específico.
- Mediante el uso del ABACO.

### 3.2 Cálculo de un banco de capacitores mediante el empleo de las facturas emitidas por las empresas generadoras de electricidad.

En nuestro país, según la tarifa se factura por la potencia instalada, por la máxima demanda (Kw), el consumo de energía activa (Kwh) y por el consumo de energía reactiva (KVARh). El resultado del cálculo de condensadores se obtiene mediante la tabulación directa siguiendo los siguientes pasos:

a) Se recomienda trabajar con los recibos de electricidad de los últimos 12 meses (1 año) como mínimo para poder apreciar la estacionalidad del consumo. Por ejemplo el caso de las empresas que fabrican bebidas gaseosas, helados, su consumo de energía crece en los meses de verano y decrece en los meses de invierno.

b) Conseguir el número de horas trabajadas efectivas promedio por mes.

$$\overline{KVAR} = \frac{KVARh}{t} \quad (3.1)$$

$$\overline{KW} = \frac{KWh}{t} \quad (3.2)$$

c) Verificar esto para todos los meses lo siguiente: el Kw promedio para cualquier mes debe ser menor que la máxima demanda. Los mese que no cumplan con este requisito no debe ser considerados en la tabulación.

d) Cálculo del factor de potencia promedio mensual.

$$fp = \cos \left( \arctg \left( \frac{KVARh}{KWh} \right) \right) \quad (3.3)$$

e) Con los cálculos anteriormente realizados, se va a la siguiente tabla

- f) Al ser este método el más empleado para instalaciones eléctricas de bajas potencias donde la potencia de los capacitores a instalar es menor de 100 KVAr, se recomienda instalar bancos fijos de capacitores con las debidas precauciones para no sobrecompensar y cuya potencia no sea menor que los KVAr promedio anual, es decir: (KVAr del banco menor a KVAr promedio anual).

Se desea determinar los KVAr requeridos para elevar el factor de potencia de una planta industrial cuya potencia contratada es de 400 KW y cuya potencia promedio se puede apreciar en la tabla 1, así como el gasto mensual debido al consumo de energía reactiva.

Tabla 1 Factor de potencia actual.

Factor de potencia actual				
Mes	Kw	KVAr	Fp	gasto
Enero	227	276	0.6350	1698
Febrero	257	300	0.6508	1876
Marzo	226	255	0.6629	1620
Abril	240	260	0.6780	1661
Mayo	219	240	0.6733	1545
Junio	219	241	0.6728	1546
Julio	235	287	0.6339	1761
Agosto	251	349	0.5837	2043
Septiembre	239	364	0.5485	2070
Octubre	252	382	0.5502	2176
Noviembre	238	342	0.5716	1978
Diciembre	249	354	0.5758	2054

Gasto anual KVAr = \$ 22,048.00

Fp promedio anual = 0.62

Elevando el factor de potencia a 0.95 y con los mismos parámetros volvemos a tabular y obtener.

Tabla 2 Factor de potencia 0.91

Factor de potencia 0.91				
Mes	Kw	KVAr	Fp	Gasto (\$)
Enero	227	75	0.95	1135
Febrero	257	84	0.95	1285
Marzo	226	74	0.95	1130
Abril	240	79	0.95	1200
Mayo	219	72	0.95	1095
Junio	219	72	0.95	1085
Julio	235	77	0.95	1175
Agosto	251	82	0.95	1255
Septiembre	239	79	0.95	1195
Octubre	252	83	0.95	1200
Noviembre	238	78	0.95	1290
Diciembre	249	82	0.95	1245

Gasto anual KVAr = \$ 1460

Es decir, aumentando el factor de potencia a 0.95 se ahorra anualmente \$ 7,788, sin considerar el ahorro debido a la disminución de las pérdidas por calentamiento ( $I^2 \cdot R$ ), ya que la corriente de línea será menor.

La tabla 3 nos muestra los resultados empleando la tabla 1.

Mes	Factor de potencia		Kw	KVAr requerido
	Actual	Requerido		
Enero	0.6350	0.95	227	201.5
Febrero	0.6508	0.95	257	215.4
Marzo	0.6629	0.95	226	181.0
Abril	0.6780	0.95	240	181.3
Mayo	0.6733	0.95	219	168.8
Junio	0.6728	0.95	219	209.5
Julio	0.6339	0.95	235	266.7
Agosto	0.5837	0.95	251	285.8
Septiembre	0.5485	0.95	239	299.6
Octubre	0.5502	0.95	252	263.4
Noviembre	0.5716	0.95	238	271.7
Diciembre	0.5758	0.95	249	

En la tabla 3 se puede apreciar que se requiere de un banco de capacitores de 300 KVAr para obtener un factor de potencia de 0.95.

El costo aproximado de un banco de compensación Automática es de \$ 50.00/KVAr, luego tenemos:

$$\text{Tiempo de retorno de la inversión} = \frac{300 * \$50}{\$22078 - \$14260} = 1.93 \text{ años}$$

$$\% \text{ aumento CS} = 100 - \left( \frac{1 - 0.62}{0.95} \right) = 34.74\%$$

donde:

CS – capacidad del sistema.

$$\% \text{ RPR respecto al estado inicial} = 100 * \left( \frac{1 - 0.622}{0.952} \right) = 57.4\%$$

donde:

RPR – reducción de pérdidas respecto.

### 3.3 Cálculo de un banco de capacitores mediante el empleo de tablas.

Si disponemos de la potencia y características del total de los receptores, así como de sus ciclos de trabajo, calcularemos la potencia reactiva máxima necesaria en función de la simultaneidad y el rango de los posibles escalones. Adjuntamos la tabla 4 del factor f, en función de los factores de potencia inicial y corregida.

Tabla 4 Factor de potencia requerido

Factor de potencia requerido $\cos \varphi_2$													
$\cos \varphi_1$	0.70	0.75	0.80	0.82	0.85	0.87	0.90	0.92	0.94	0.95	0.96	0.98	1.00
0.20	3.88	4.02	4.15	4.19	4.28	4.3	4.41	4.46	4.51	4.57	4.59	4.69	4.90
0.25	2.85	2.99	3.17	3.12	3.25	3.32	3.38	3.45	3.50	3.54	3.58	3.66	3.87
0.30	2.16	2.30	2.43	2.48	2.56	2.62	2.69	2.75	2.81	2.85	2.88	2.97	3.18
0.35	1.66	1.79	1.93	1.98	2.06	2.12	2.19	2.25	2.31	2.35	2.38	2.47	2.68
0.40	1.27	1.41	1.54	1.59	1.67	1.72	1.80	1.86	1.93	1.96	2.00	2.08	2.29
0.42	1.14	1.28	1.41	1.46	1.54	1.59	1.68	1.74	1.80	1.83	1.87	1.95	2.16
0.44	1.02	1.16	1.29	1.34	1.42	1.47	1.56	1.62	1.67	1.71	1.75	1.83	2.04
0.46	0.91	1.05	1.18	1.23	1.31	1.36	1.45	1.50	1.56	1.60	1.64	1.72	1.93
0.48	0.80	0.95	1.08	1.13	1.20	1.26	1.33	1.40	1.47	1.49	1.54	1.61	1.82
0.50	0.71	0.85	0.98	1.03	1.11	1.18	1.25	1.31	1.37	1.40	1.44	1.52	1.73
0.52	0.62	0.76	0.89	0.94	1.02	1.08	1.16	1.22	1.28	1.31	1.35	1.43	1.64
0.54	0.54	0.68	0.81	0.86	0.94	0.99	1.07	1.13	1.19	1.23	1.20	1.35	1.56
0.56	0.46	0.60	0.73	0.78	0.86	0.91	1.00	1.05	1.12	1.15	1.18	1.27	1.48
0.58	0.38	0.52	0.65	0.70	0.78	0.85	0.92	0.98	1.04	1.07	1.11	1.19	1.40
0.60	0.31	0.45	0.58	0.64	0.71	0.78	0.85	0.91	0.98	1.01	1.05	1.13	1.34
0.62	0.24	0.38	0.52	0.57	0.65	0.70	0.78	0.84	0.90	0.93	0.97	1.06	1.26
0.64	0.18	0.32	0.45	0.50	0.58	0.63	0.72	0.77	0.83	0.87	0.90	0.99	1.20
0.66	0.12	0.26	0.39	0.44	0.52	0.57	0.65	0.71	0.77	0.81	0.85	0.93	1.14
0.68	0.06	0.20	0.33	0.38	0.46	0.51	0.59	0.65	0.71	0.75	0.77	0.87	1.08
0.70		0.14	0.27	0.32	0.40	0.45	0.53	0.59	0.66	0.69	0.73	0.81	1.02
0.72		0.08	0.21	0.27	0.34	0.40	0.48	0.54	0.60	0.63	0.67	0.76	0.96
0.74		0.03	0.16	0.21	0.29	0.35	0.42	0.48	0.55	0.58	0.62	0.70	0.90
0.76			0.10	0.16	0.24	0.29	0.37	0.43	0.49	0.52	0.56	0.65	0.85
0.78			0.05	0.10	0.18	0.24	0.31	0.38	0.44	0.47	0.51	0.59	0.80
0.80				0.05	0.13	0.18	0.26	0.32	0.39	0.42	0.46	0.54	0.75
0.82					0.08	0.13	0.21	0.27	0.33	0.37	0.40	0.49	0.69
0.84					0.03	0.09	0.16	0.22	0.28	0.32	0.35	0.44	0.64
0.86						0.03	0.11	0.17	0.23	0.26	0.30	0.39	0.59
0.88							0.06	0.11	0.18	0.21	0.25	0.33	0.54
0.90								0.06	0.12	0.15	0.19	0.27	0.48
0.92									0.06	0.09	0.13	0.22	0.42
0.94										0.03	0.07	0.16	0.36
0.96												0.09	0.28
0.98													0.21

### 3.4 Cálculo de un banco de capacitores mediante el empleo de instrumentos y equipos registradores.

#### 1. Con instrumentos de medición.

Si la instalación posee los equipos de medición adecuados, o bien a partir de los equipos de la compañía suministradora, podremos saber la potencia activa y reactiva consumida en un ciclo diario y en un ciclo anual.

En este caso, la potencia total de la batería será:

$$\cos \varphi(\text{medio}) = \frac{\sum KW \cdot h}{\sum KWA \cdot h} \tag{3.4}$$

### Elección de los escalones.

En el mercado existen escalones desde 1 hasta 25 KVAR, en cada caso particular, será necesario seleccionar los más adecuados para cada tipo de instalación. Podemos acogernos para ello de los siguientes criterios:

- Pequeños escalones, permiten una regulación mejor y más continua.
- Si el perfil de carga de la instalación es continuo y poco escalonado, podemos recurrir a escalones pequeños.
- Si el perfil presenta llanos y escalones bruscos, es preferible recurrir a pocos escalones, lo más próximo posible a los de perfil.
- Grandes máquinas representan escalones bruscos.
- Mucha maquinaria y pequeña corresponderá en general a perfiles continuos de carga, pocos escalones.

### Formas de instalación.

Debemos prever para instalar los equipos de condensadores automáticos:

1. El local será amplio para permitir la inspección, reparación y ampliación si es necesario.
2. Esta sala, deberá estar bien ventilada, a fin de permitir una fácil evacuación del calor generado, si es preciso ventilación forzada.
3. La puerta de acceso debe ser de apertura hacia el exterior y estar dotada de cerradura, que impida el acceso de personas no autorizadas.
4. Se deberá prever una buena toma de tierra, a la que conectar los herrajes, armarios, etc.
5. Disponer medidas de detección y extinción de incendios.

Monofásico:

- 1) con medidor de factor de potencia.
- 2) usando 1 watímetro (vatímetro), 1 amperímetro y un voltímetro.

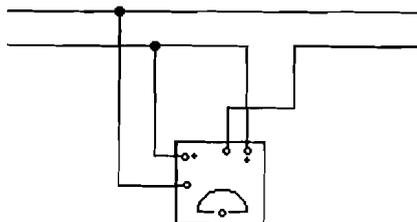


Fig. 1 Con medidor de factor de potencia.

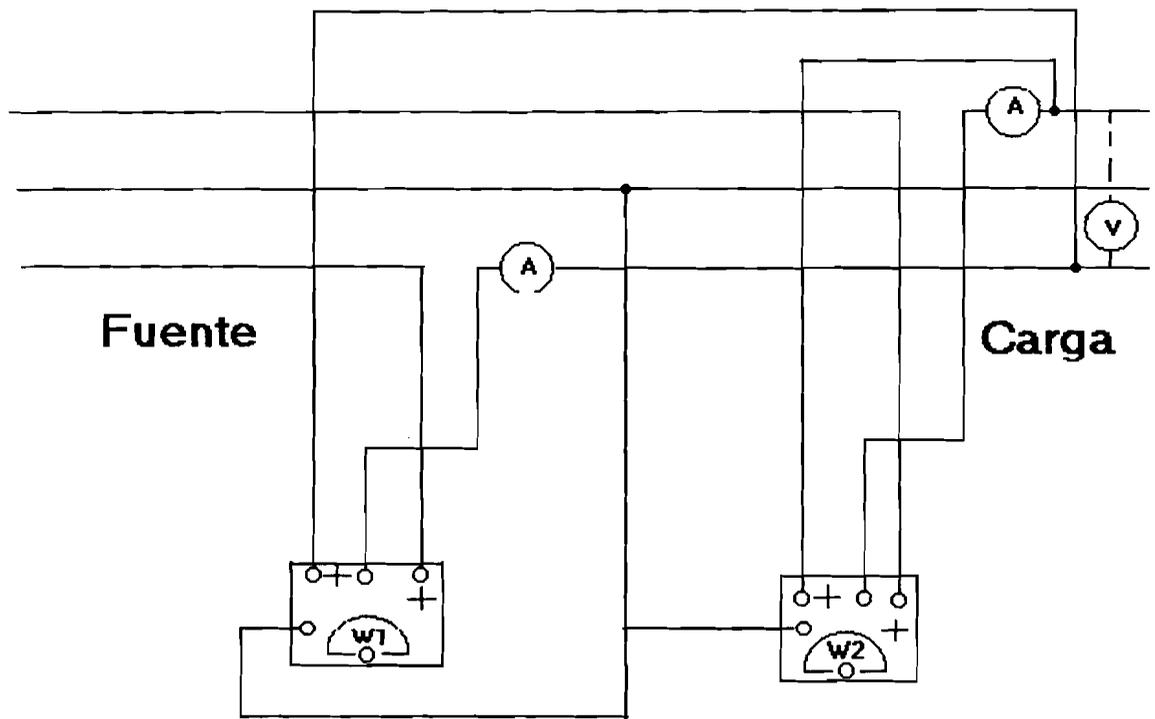


Fig. 2 Con dos Wattímetro trifásico, dos amperímetros y un voltímetro.

$$F.P = \frac{W_1 + W_2}{AV\sqrt{3}}$$

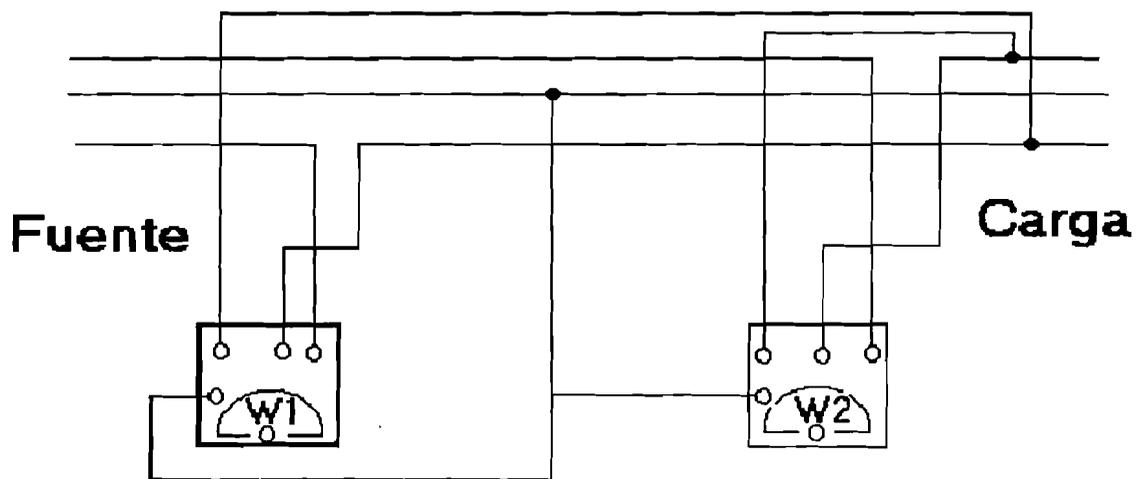


Fig. 3 Usando dos Wattímetros monofásicos y la fórmula tangente.

$$\tan\phi = 1.732 \frac{(W_1 - W_2)}{(W_1 + W_2)} \quad (3.5)$$

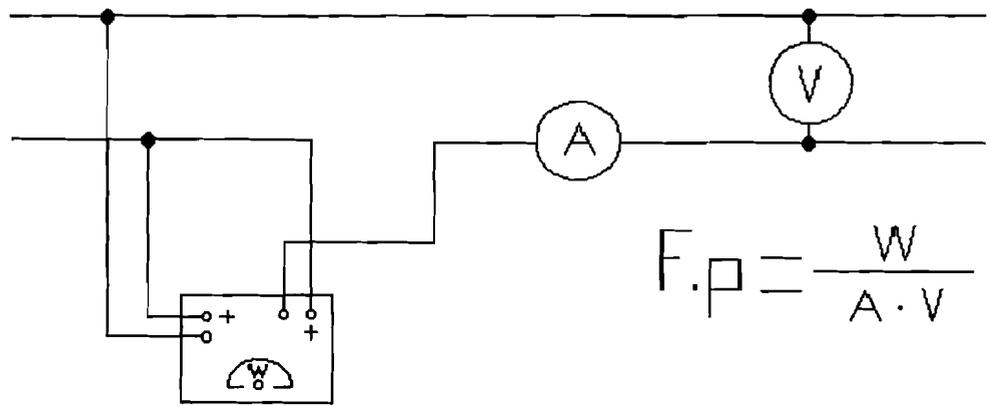


Fig. 4 Usando Wattímetro, amperímetro, voltímetro

Trifásico: 1- con medidor de factor de potencia trifásico.

2- con wattímetro trifásico, 2 amperímetros y voltímetro.

3- con 2 wattímetro monofásico, 2 amperímetros y voltímetro.

4- por medio de 2 wattímetros monofásicos y la curva.

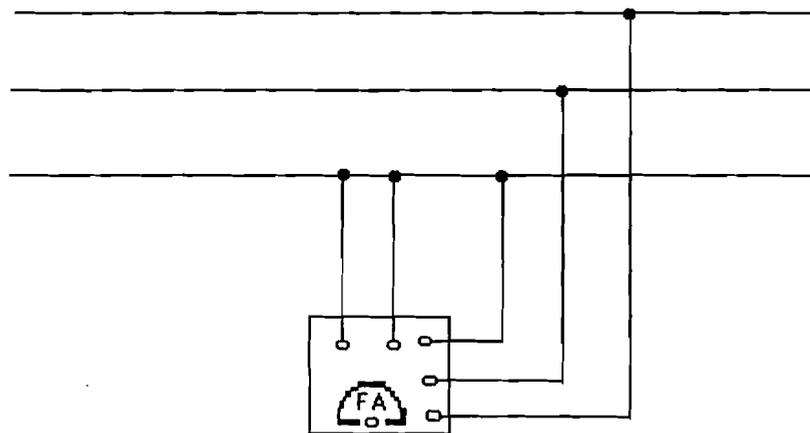


Fig. 5 Con medidor de factor de potencia trifásico.

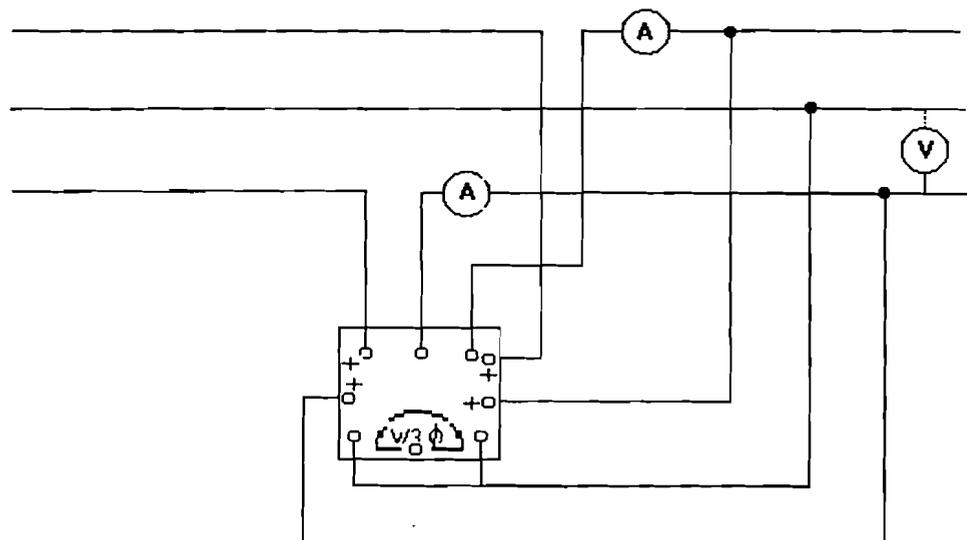


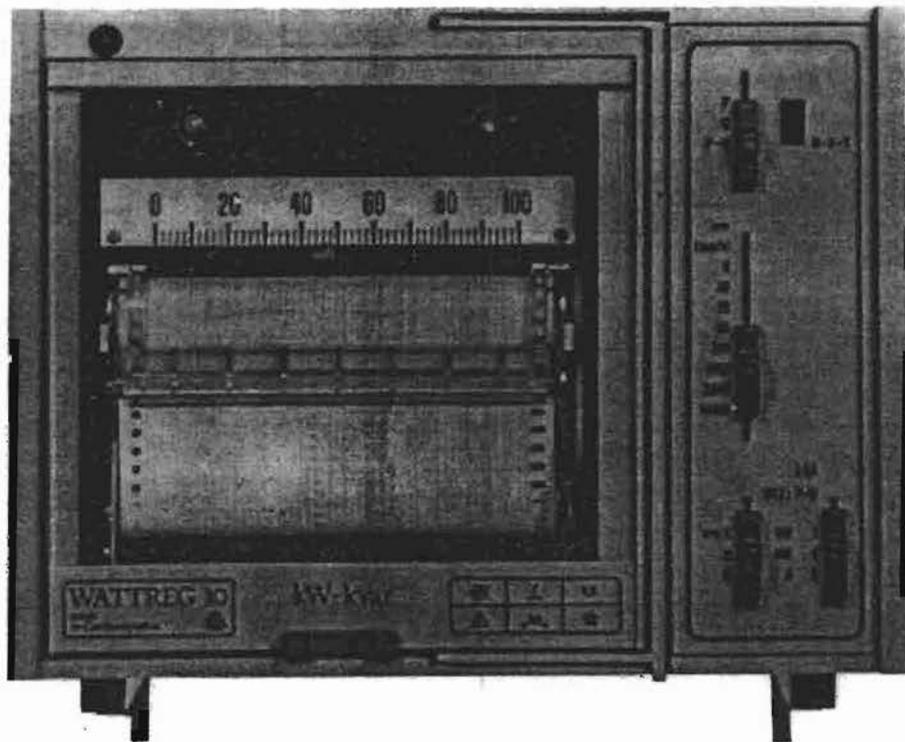
Fig. 6 Con wattímetro trifásico. 2 amperímetros y voltímetro.

$$F.P = \frac{W_{3\phi}}{AV\sqrt{3}} \quad (3.6)$$

Nota: todos los circuitos de los wattímetros deben estar conectados originalmente con la polaridad adecuada; si es necesario invertir el wattímetro de lectura baja a fin de obtener una lectura, ésta debe entonces considerarse negativa.

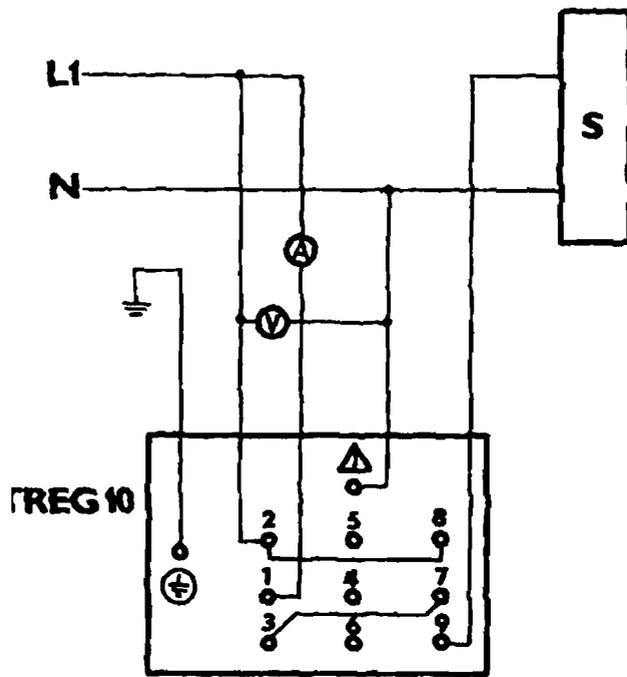
#### Usando registradores gráficos

Uno de los equipos empleados para la medición de la potencia activa, reactiva es el "WATTREG 10" de fabricación alemana el equipo es mostrado en la siguiente figura

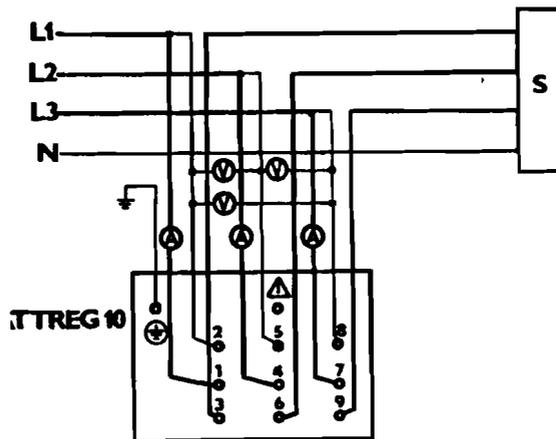


Su forma de conexión es la siguiente

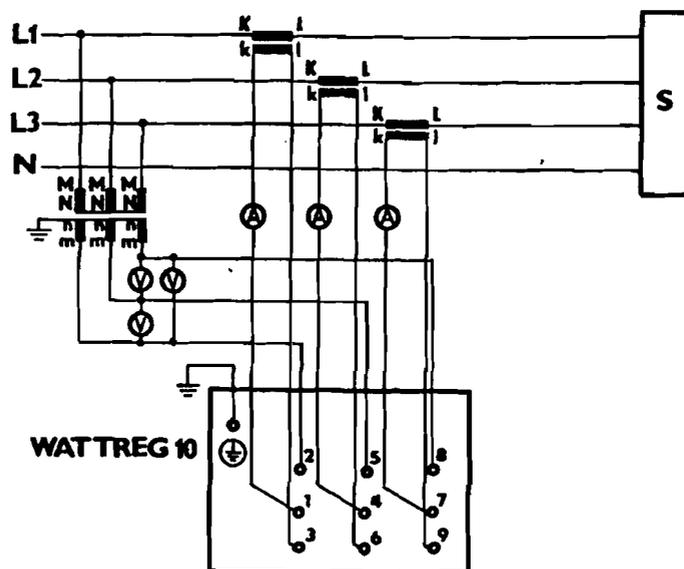
- a) Monofásica.



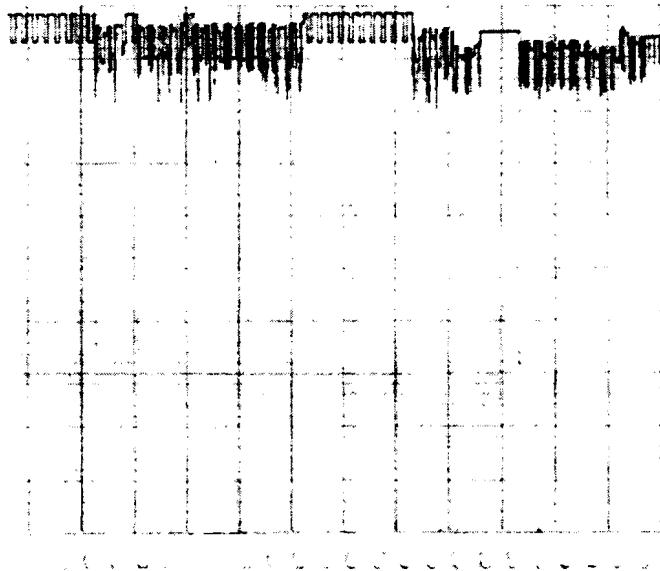
b) Trifásico sin transformadores.



b) Trifásico con transformadores.



Del cual se obtiene el registro siguiente



Y su forma de cálculo es realiza de la siguiente manera:

Si el registrador esta conectado para medir potencia activa será

$$P = \frac{\alpha}{100} \cdot Kw \cdot \gamma_{TC} \quad [Kw] \quad (3.7)$$

$\alpha$ : $\Rightarrow$  Limite superior del campo de escala

$\gamma_{TC}$ : $\Rightarrow$  Relación del transformador de corriente.

$Kw$ : $\Rightarrow$  Constante del wattimetro

$$Kw = 4 \text{ (hasta 440 V)}$$

$$Kw = 1 \text{ (para 110 V)}$$

Si estoy midiendo corriente:

$$I = \frac{\alpha}{100} \cdot X_{max} \cdot \gamma_{TC} \quad [A] \quad (3.8)$$

$X_{max}$ : $\Rightarrow$  Constante de corriente seleccionado

### 3.4 Como calcular los KVA reactivos necesarios para elevar el factor (Abaco)

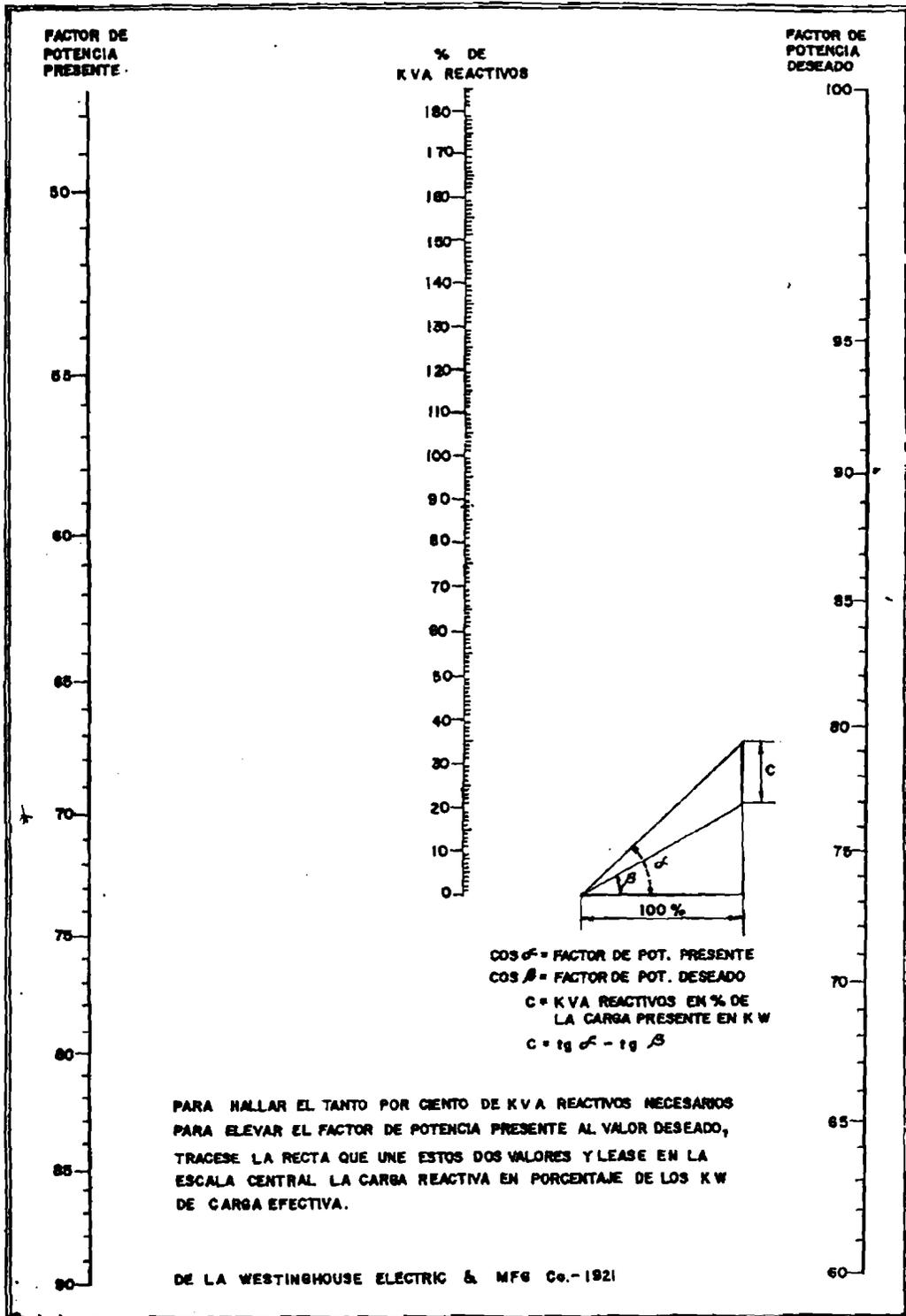
Datos necesarios:

1. Potencia activa(Kw)
2. Factor de potencia presente.
3. Factor de potencia deseado.

Veamos un ejemplo que es más representativo.

1. potencia activa(kw) =75kw
2. factor de potencia presente = $\cos\alpha$ =60%

USO DEL ÁBACO



Se traza una línea en el ábaco por los puntos 60 (escala de factor de potencia presente):85 (Escala de factor de potencia deseado).

Los KVA reactivos en % se obtienen leyendo la escala intermedia:

KVA(reactivos) -74%

Luego sera el 74% de 75

$0.74 \times 75 = 55$

**POTENCIA ACTIVA**

La potencia activa se obtiene midiendo con un wattímetro o por otros medios equivalentes.

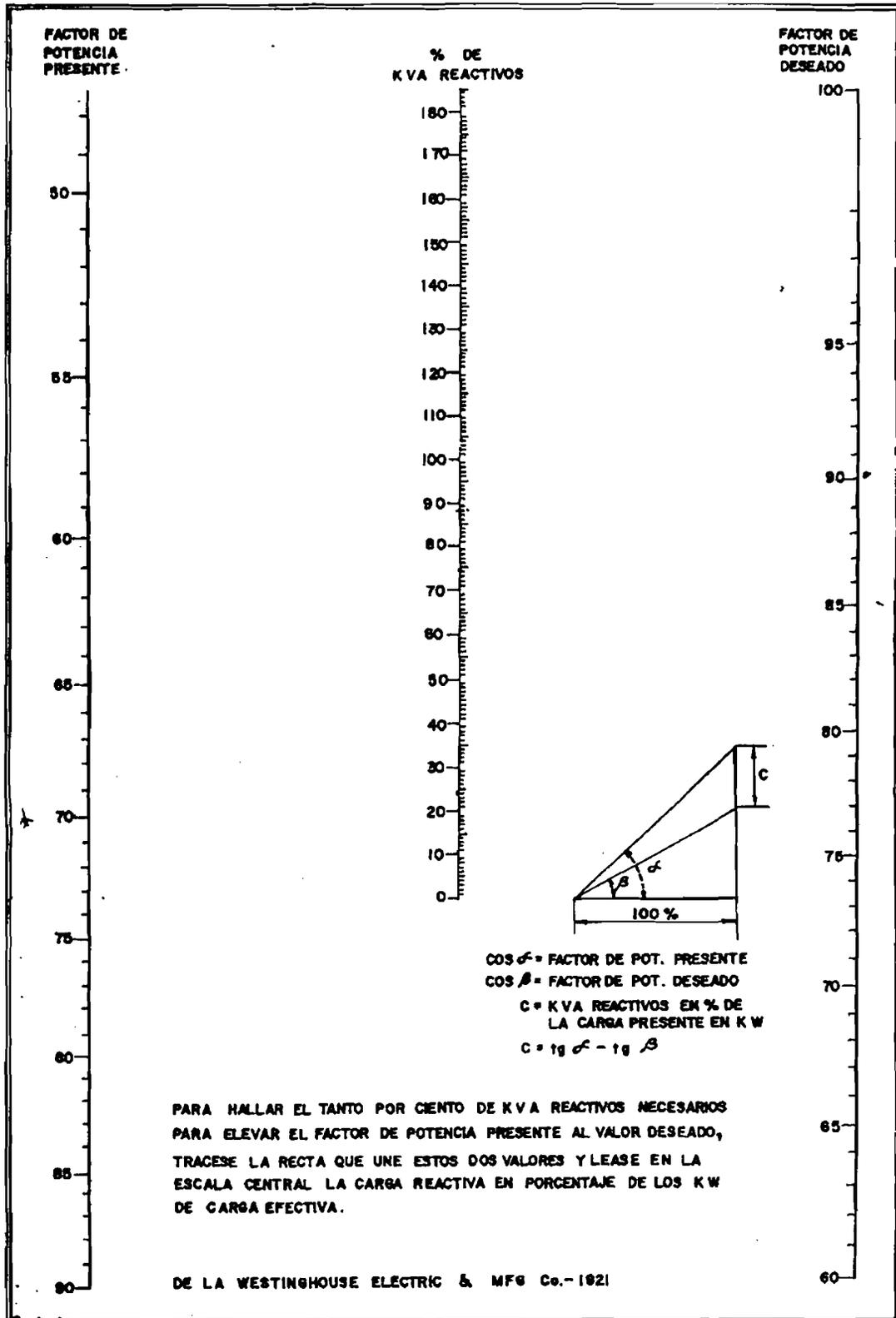
**FACTOR DE POTENCIA PRESENTE**

Se determina por medio de un factorímetro, en el punto deseado.

**FACTOR DE POTENCIA DESEADO**

Es orientado por la Empresa Consolidada de la electricidad.

USO DEL ÁBACO



Se traza una línea en el ábaco por los puntos 60 (escala de factor de potencia presente):85 (Escala de factor de potencia deseado).

Los KVA reactivos en % se obtienen leyendo la escala intermedia:

KVA(reactivos) -74%

Luego sera el 74% de 75

$0.74 \times 75 = 55$

$$\underline{KVA(\text{reactivos})=55}$$

**Determinación de los KVA capacitivos necesarios para corregir el factor de potencia.**

¿Cómo se determina la cantidad necesaria de KVA capacitivo para corregir el factor de potencia de un valor a otro?.

Para esto debemos recordar las relaciones que habíamos estudiado en clases. En nuestro cálculo emplearemos la relación denominada tangente, que según la relación:

$$\tan\varphi = \frac{KVA_r}{KW} \quad (3.9)$$

vamos a suponer que la demanda real en KW no varía solamente corregiremos el factor de potencia para modificar las condiciones de la demanda reactiva, en este caso:

$$\tan\varphi_1 = \frac{KVA_{r1}}{KW} \quad (3.10)$$

y para el nuevo ángulo después de la corrección:

$$\tan\varphi_2 = \frac{KVA_{r2}}{KW} \quad (3.11)$$

Estas relaciones se muestran gráficamente en la figura 6. Si despejamos  $KVA_{r1}$  y  $KVA_{r2}$  obtenemos las nuevas relaciones siguientes:

$$KVA_{r1} = KW \cdot \tan\varphi_1 \quad (3.12)$$

$$KVA_{r2} = KW \cdot \tan\varphi_2 \quad (3.13)$$

Como la cantidad de KVA capacitivo debe ser igual a la cantidad de KVA que queremos anular, tenemos que:

$$CKVA = KVA_1 - KVA_2 \quad (3.14)$$

$$CKVA = KW \cdot \tan\varphi_1 - KW \cdot \tan\varphi_2 \quad (3.15)$$

$$CKVA = KW \cdot (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2)$$

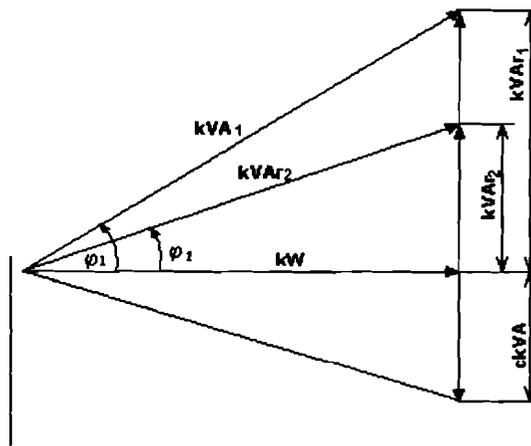


Fig. 7 Reducción del ángulo  $\varphi$  mediante la conexión de una determinada potencia reactiva en el circuito.

Para aplicar esta relación debemos buscar los valores de las tangentes correspondientes al ángulo original y el que se desea obtener después de la compensación. Anteriormente hemos tratado la forma de obtener estos valores. Si calculamos la reducción de pérdidas y capacidad liberada obtenida mediante la corrección del factor de potencia, podemos también saber que beneficios nos brinda la conexión de capacitores para posibles análisis técnico-económicos.

En el ejemplo tenemos una demanda de 150 KVA y factor de potencia 0.75 con un factor de potencia que queremos mejorar a 0.9 ¿qué cantidad de KVA capacitivos debemos conectar para estos?

Si aplicamos la relación:

$$KW = KVA \cdot \cos \varphi$$

$$KW = 0.75 \cdot 150 = 112.5 \text{ kw}$$

Como sabemos, el coseno del ángulo es igual al factor de potencia, buscamos las funciones trigonométricas correspondientes:

$$\cos \varphi_1 = 0.75$$

$$\tan \varphi_1 = 0.88$$

$$\cos \varphi_2 = 0.90$$

$$\tan \varphi_2 = 0.48$$

Al aplicar la otra relación:

$$CKVA = KW \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

$$CKVA = 112.5 \cdot (0.88 - 0.48) = 37 \text{ CKVA}$$

O sea, si volvemos al ejemplo anterior, al conectar 37 CKVA en el circuito que lleva esta demanda podemos liberar 17% de capacidad y 30% de pérdidas según habíamos visto.

El cálculo anterior se ha hecho sobre la base de una demanda en KW invariable.

En la práctica, este caso no siempre es así. Generalmente la demanda y el factor de potencia de la industria varía cada hora. Si tuviéramos que compensar una instalación cuya carga varía con el tiempo, el método de análisis es el siguiente.

Para determinar la cantidad de KVA capacitivo que tenemos que conectar, debemos valernos de una gráfica general de demanda, tomando un día representativo de trabajo de la industria. De este gráfico tenemos los valores de demanda reales y el factor de potencia de la madrugada y compensamos para factor de potencia unitario para esa hora de demanda mínima. Como a esta hora las demandas activas y reactivas son las más bajas del ciclo, esto asegura que a la hora de mínima demanda el factor de potencia no se haga capacitivo. Lo expuesto ocurre porque en este caso la demanda capacitiva que se conecta es mayor que la de la industria, y el circuito se sobrecompensa.

La sobrecompensación general no se aplica y debe evitarse a no ser que mediante la sobrecompensación de una parte del circuito que quiere beneficiarse otra parte del sistema de alimentación eléctrica. En este caso enviamos la demanda capacitiva del circuito a otras partes donde se necesite. Sin embargo, debemos tener en cuenta que la carga capacitiva en exceso carga las líneas iguales que la inductiva, este hecho se muestra en la figura 8.

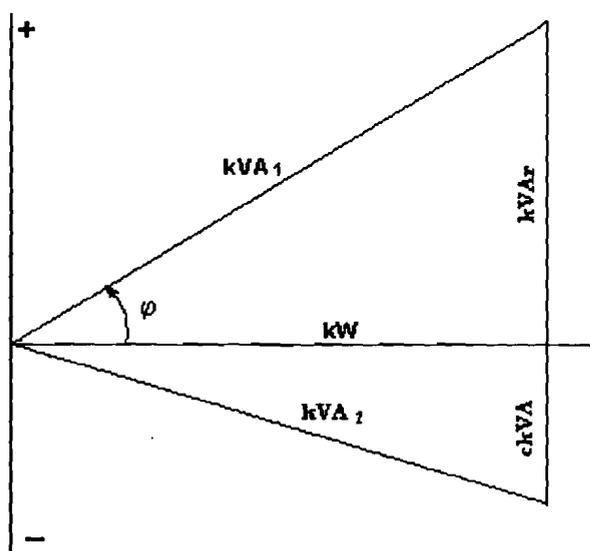


Fig. 8 Situación relativa de la potencia aparente, activa, reactiva inductiva y reactiva capacitiva.

En esta figura se ve que la carga capacitiva corresponde a  $KVA_2$ , sin embargo, si el factor de potencia se hace unitario, entonces según la relación  $\cos \varphi = \frac{KW}{KVA}$ ,  $KVA$  es igual a  $KW$ , o sea, que la demanda aparente en ese caso será menor que  $KVA_1$  y  $KVA_2$ .

Después de determinar la cantidad de  $KVA$  capacitivo para la hora de mínima demanda, tenemos que determinar que factor de potencia obtendríamos a otra hora del día, cuando la demanda y el factor de potencia tengan valores distintos con esos condensadores conectados fijos a línea. Este cálculo puede efectuarse empleando la relación:  $CKVA = KW \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$ , fijando los  $KVA$  capacitivo,  $KW$  y  $\tan \varphi_1$  a la hora que queremos analizar y despejando  $\tan \varphi_2$  para esa hora.

Después de hallar el valor de la tangente, hallamos el coseno correspondiente a la tangente hallada y después será el nuevo valor del factor de potencia a esa hora.

# Capítulo IV

## CAPITULO IV Conexión de los capacitores.

### 4.1 Evaluación de los beneficios obtenidos debido al incremento del factor de potencia por la instalación de un banco de capacitores.

#### Incrementos de la capacidad del sistema.

% de incremento de la capacidad.

$$100 * \left( 1 - \frac{fp_o}{fp_f} \right) \quad (4.1)$$

donde

$FP_o$  – factor de potencia inicial.

$FP_f$  – factor de potencia final.

Reducción de la pérdida en los cables debido al calor.

Porcentaje de reducción de pérdidas.

$$100 * \left( 1 - \frac{fp_o^2}{fp_f^2} \right) \quad (4.2)$$

Aumento del voltaje.

$$\% \text{ incremento del voltaje} = \frac{\text{capacitor KVA} * \text{impedancia del transformador}}{\text{KVA del transformador}}$$

Tiempo de retorno de la corriente.

$$\text{Tiempo de retorno de la corriente} = \frac{\text{costo del banco de capacitores (\$)}}{\text{ahorro anual (\$)}}$$

Ejemplo de aplicación.

#### Mejora del factor de potencia para lámparas fluorescentes.

En el ejemplo que se da a continuación se puede apreciar los beneficios que se obtienen debido al empleo de fluorescentes con alto factor de potencia.

Un balastro para una lámpara fluorescente es un transformador especial, el cual suministra el alto voltaje requerido durante el arranque para que posteriormente actúe como dispositivo limitador de corriente. Tales balastros se encuentran tanto para factores de potencia bajos como altos. En la tabla 1 se puede apreciar datos de operaciones para balastros típicos diseñados para operar en pares con lámparas de 40 Watt.

Dos balastos de bajo factor de potencia requerirán de 1.394 ampéritos de corriente de línea para poder funcionar, mientras que tres balastos de alto factor de potencia requerirán 1.368 ampéritos. El voltaje de entrada será de 186 volt para los dos balastos de bajo factor de potencia y de 276 volt para los tres balastos de alto factor de potencia.

Tabla 1

Lámpara (W)	Corriente (A)	Voltaje de línea	Tensión de línea	Watts de entrada	Factor de potencia
40	0.430	220	0.697	93	0.606
40	0.430	220	0.456	92	0.916

Operando de la misma línea de distribución. El mismo voltaje de línea y muy pequeñas diferencias en la corriente de línea, el número de balastos. El voltaje de entrada y la cantidad de iluminación generada, podrían ser incrementados en aproximación a 50% cuando el factor de potencia sea aumentado de 0.606 a 0.916.

Muchos de estos dispositivos tienen condensadores incluidos como un accesorio estándar. Para poder poseer una corrección del factor de potencia y esta va a simplificar enormemente la instalación, los fusibles, y el mantenimiento de los condensadores.

## 4.2 Las instalaciones del alumbrado; ahorro de energía y mejora del factor de potencia.

### Elementos básicos de la instalación.

Comenzaremos indicando que la necesidad de ahorro de energía, es fundamental, no solo a nivel particular, sino también a nivel nacional y mundial; por ello, es cada vez más frecuente, el empleo de lámparas de descarga en lugar de lámparas de incandescencia, pues su consumo es menor.

No obstante, para que el consumo sea mínimo, es necesario que la instalación esté correctamente ejecutada y los equipos sean de buena calidad.

Es muy frecuente el empleo de reactancias y cebadores de baja calidad, que producen grandes pérdidas y un bajo factor de potencia. Deberemos desechar este tipo de elementos, que suponen una economía falsa.

Los tipos de lámparas de descarga son:

1. **Lámparas de cátodo frío:** en la que los electrodos provocan una corriente interior de electrones, trabajando a temperatura inferior a la de incandescencia. La corriente suele ser de unos pocos miliamperes, la densidad de corriente baja y las tensiones de encendido muy elevadas.

2. **Lámparas de encendido caliente:** los electrodos trabajan a incandescencia con emisión termoiónica, reduciéndose la tensión de encendido. Dentro de este tipo existen los siguientes sistemas:

- **Arranque por cebador:** los electrodos son precalentados mediante una corriente de arranque, que se establece al cerrar el cebador y la tensión es la de red, incrementados por la autoinducción en la reactancia al abrir el cebador.

Si la tensión de la red es suficiente, la reactancia es del tipo de choque y caso contrario, autotransformador de dispersión, a fin de elevarla en el encendido. Los tubos fluorescentes tienen este sistema.

- **Lámparas de arranque rápido:** se elimina el cebador y se proporciona el caldeo mediante una tensión permanente de 3.6 V procedente de un arrollamiento de la reactancia.

Análogamente en el caso anterior, según la tensión de la red, se empleará una bobina de choque o un autotransformador de dispersión como reactancia. A este tipo, pertenecen los tubos fluorescentes con gran cantidad de materia emisora en el cátodo para evitar un rápido agotamiento.

- **Lámparas de arranque instantáneo:** se produce la descarga de electrones por aplicación de una elevada diferencia de potencial a los electrodos de la lámpara, sin proceder a su caldeo.

A este tipo pertenecen:

- ◆ Fluorescentes Slimline.
- ◆ Lámparas de vapor de mercurio de alta presión.
- ◆ Lámparas de vapor de sodio de baja presión.
- ◆ Lámparas de vapor de sodio de alta presión.

Para el último tipo, es necesario una tensión de 3 a 4.5 KV, que es proporcionada en el encendido por un ignitor o cebador electrónico. Van equipados con reactancias de choque o autotransformador de dispersión, según la tensión de la red; generalmente puede ser adecuada la tensión de 220 V para su arranque.

En cuanto a las reactancias, diremos que deben cumplir la norma UNE 20.152, aunque hay fabricantes que utilizan las normas VDE alemanes y las CEI.

Las principales cualidades de una buena reactancia son:

- Ser del menor tamaño posible.
- Dar correctos valores de corriente y tensión de arranque.
- Suministrar una corriente adecuada en la lámpara, que no difiera más de un 10% del nominal, con tensión y frecuencias adecuadas en la red.
- Que de la menor cantidad de armónicos.
- Que de un máximo de rendimiento, es decir, que tengan pérdidas mínimas.
- Que disipe bien el calor generado en su masa.
- Presentar un aislamiento suficiente, que deberá presentar entre partes conductoras y su cubierta metálica, una resistencia mínima de  $100\text{ M}\Omega$  al aplicarle 500 Vcc y soportar 2 KV a 50 Hz en un minuto.

**Ahorro de energía por disminución del nivel de iluminación manteniendo la uniformidad.**

Este sistema está siendo muy aceptado en los últimos tiempos, pues consiste en hacer trabajar las lámparas al 60% de su potencia nominal, lo que es preferible a proceder a apagar un tercio de los puntos de luz, pues se crean zonas de sombra y penumbra con el siguiente perjuicio, sobre todo en vías públicas.

Se consigue de esta forma, que la lámpara produzca un flujo superior del 50% del nominal, no es conveniente proceder a reducciones mayores en la potencia de trabajo de la lámpara, pues la reduciría enormemente al rendimiento del sistema, pudiendo además hacer excesivamente capacitiva la instalación, lo que está expresamente prohibido en las normas MIEBT.

Por el contrario, reducciones de potencia inferiores a las indicadas no serían rentables por no producir una amortización suficientemente rápida.

La forma de efectuar la instalación, consiste en instalar la base del báculo o columna de cada luminaria, un equipo reductor de consumo, con su unidad de conmutación.

En el cuadro general, se podrá instalar un conmutador horario programable, que mediante un circuito auxiliar, accionará la unidad de conmutación.

Adjuntamos seguidamente varios esquemas aclaratorios, figuras 1, 2, 3:

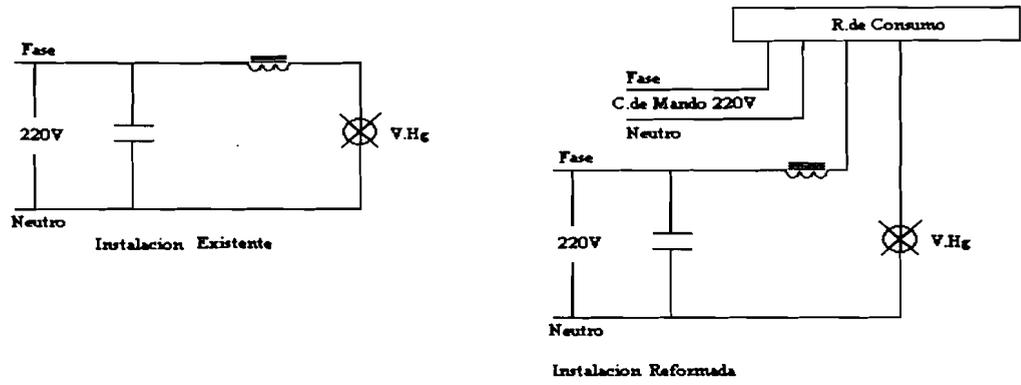


Fig. 1

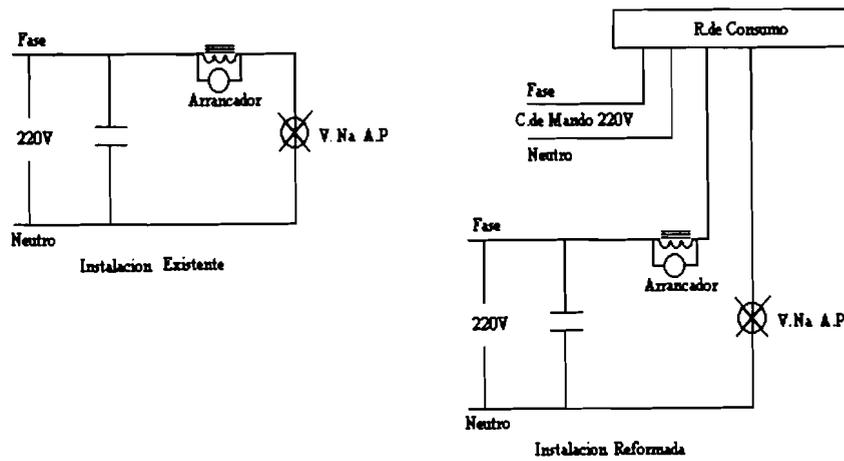


Fig. 2

Sistema de Instalación nuevo en vapor de Hg ó Na

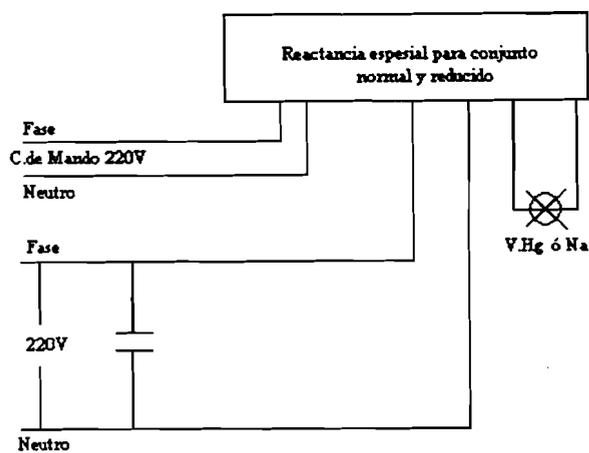


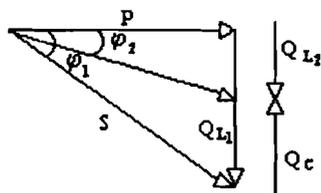
Fig. 3

Como complemento de lo anterior, señalaremos lo siguiente:

- Debemos elegir en el catálogo del fabricante el reductor de consumo adecuado a la potencia de la lámpara, actualmente se fabrican para vapor de mercurio y para vapor de sodio, hasta 500 Watt de potencia.
- La línea auxiliar de mando deberá estar formada por fase y neutro, con la sección adecuada para que la caída de tensión sea inferior al 5%, a este respecto indicaremos que el consumo auxiliar, es aproximadamente de 35 mA.

### 4.3 Mejora del factor de potencia.

Para determinar el condensador a instalar, fijémonos en la Figura 4 y recordemos:



$$Q_c = Q_{L1} - Q_{L2}$$

$$Q_{L1} = P \cdot \tan \varphi_1$$

$$Q_{L2} = P \cdot \tan \varphi_2$$

$$Q_c = P \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) = P \cdot f$$

Fig. 4

siendo “P” un factor, que se tiene normalmente tabulado y cuyas tablas adjuntamos adelante.

Una vez obtenido  $Q_c$ , recordemos que su valor es  $I_c \left( \frac{1}{\omega C} \right)$ , con lo que podemos elegir el condensador adecuado.

Para instalaciones de alumbrado público (también se puede utilizar en tubos fluorescentes en interiores), se suele alojar el condensador en el registro de la base o de la luminaria, adoptándose el sistema en paralelo, según el esquema de la Figura 5.

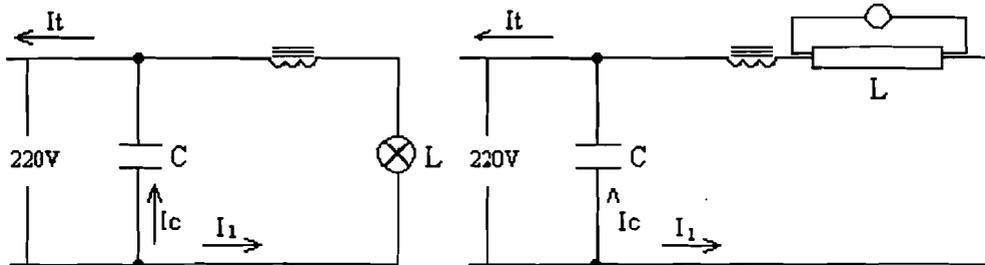


Fig. 5

El condensador a de ser adecuado para que no de una intensidad  $I_c$  (en adelanto), que compuesta con la  $I_L$  (en retraso), nos dé  $I_T$  con factor de potencia próximo a la unidad.

La tensión que debe soportar el condensador en este sistema, es la de la red y se puede admitir en su capacidad una tolerancia de  $\pm 10\%$ .

En instalaciones anteriores con tubos fluorescentes, es más conveniente, emplear el montaje en paralelo, según el esquema de la Figura 6.

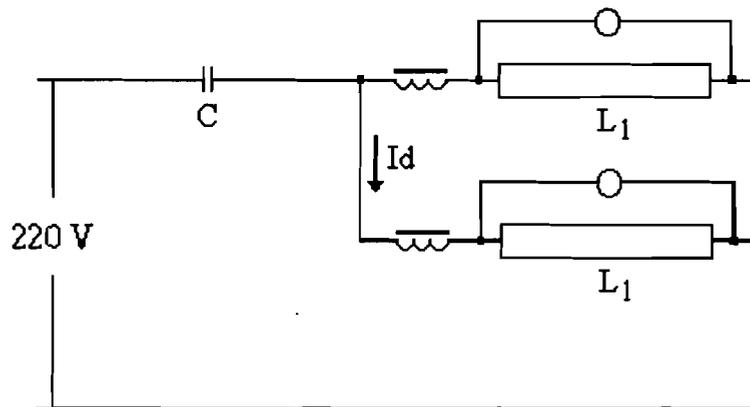


Fig. 6

Se puede montar así dos o más equipos, el condensador en serie, con una capacidad adecuada, para que presente a la frecuencia de la red una impedancia doble que la de la reactancia.

De esta forma, se tiene la ventaja de utilizar un solo condensador para dos equipos, siendo su capacidad menor que la necesaria para un equipo en paralelo. En cambio, deberá ser capaz de soportar una tensión doble de la red y la tolerancia admisible en su capacidad es de  $\pm 4\%$ .

Otra ventaja adicional que presenta este montaje, es el de corregir el efecto estroboscópico.

Como complemento, adjuntamos una tabla de potencias necesarias de condensadores para lámparas, utilizable a 220 V y 50 Hz, montaje en paralelo para corregir el factor de potencia hasta 0.95.

Tabla 2

Tipo de lámpara	Potencia de la lámpara (W)	Potencia del	Capacidad en (XF)
Tubos fluorescentes	20	0.085	5.5
Tubos fluorescentes	2x20	0.070	5.5
Tubos fluorescentes	40	0.070	4.5
Tubos fluorescentes	65	0.110	7.0
Vapor de mercurio A.P.	50	0.105	7.0
Vapor de mercurio A.P.	80	0.125	8.0
Vapor de mercurio A.P.	125	0.155	10.0
Vapor de mercurio A.P.	250	0.280	18.0
Vapor de mercurio A.P.	400	0.420	28.0
Vapor de mercurio A.P.	1000	0.920	60.0
Vapor de sodio A.P.	70	0.200	13.0
Vapor de sodio A.P.	150	0.300	20.0
Vapor de sodio A.P.	250	0.490	32.0
Vapor de sodio A.P.	400	0.680	45.0
Vapor de sodio A.P.	1000	1.520	100.0
Vapor de sodio B.P.	45	0.350	23.0
Vapor de sodio B.P.	60	0.355	23.0
Vapor de sodio B.P.	85	0.360	24.0
Vapor de sodio B.P.	140	0.380	25.0

En grandes instalaciones, podemos recurrir a instalar baterías automáticas, que se conecten o desconecten automáticamente, según el factor de potencia en la red, dependiente de los receptores en servicio, como estudiaremos más adelante, no obstante, es preferible emplear este método para fuerza y emplear la corrección individualmente en el alumbrado según lo indicado anteriormente.

#### 4.4 Mejora del factor de potencia en instalaciones de fuerza.

##### Compensación individual.

Este método consiste en conectar directamente a los bornes del receptor, el condensador adecuado técnicamente, y sin otras consideraciones que haremos en el próximo apartado, esta es la mejor solución pues:

- Reduce el coste de la energía eléctrica consumida.
- Reduce las pérdidas en el transformador de alimentación.
- Mejora la tensión en las líneas.
- Permite reducir la tensión de las líneas.
- Es fácil instalar menos unidades.
- Al desconectar el receptor, se desconecta el condensador, por lo que no habrá condensadores conectados al transformador el vacío y no se producirá resonancia de armónicos.

**Mejora del factor de potencia en transformadores.**

El condensador debe conectarse a través de fusibles, a los bornes de baja tensión del transformador, debiendo de llevar resistencias de descarga ya que el circuito de descarga natural, sobre los arrollamientos de transformador, se pueden interrumpir por medio de los fusibles.

Para evitar la presencia de resonancia debido a los armónicos, la potencia nominal del condensador se limita normalmente al 10% de la potencia nominal del transformador.

En este caso, no son de temer dificultades aunque el transformador funcione en vacío.

Cuando se conectan potencias de condensadores superiores a transformadores que funcionan en vacío, se presentan pérdidas de energía elevada en el núcleo del hierro del transformador, el cual podría calentarse en forma inadmisible.

**Mejora del factor de potencia en transformadores de soldadura.**

Con transformadores monofásicos para soldaduras al arco, se equipan con un condensador monofásico en el circuito primario.

**Mejora del factor de potencia en motores trifásicos.**

El factor de potencia de estos motores varía en amplio margen en función de la carga mecánica del motor, sobre la placa de características de cada motor está indicado un factor de potencia que sólo es válido para la potencia nominal del motor. Este valor nominal del factor de potencia depende, en una gama relativamente estrecha del tamaño y de la construcción del motor (por ejemplo, valor nominal  $\cos \varphi = 0.75$  a  $0.9$ ).

En el diagrama de la Figura 7, puede verse que el factor de potencia de un determinado tipo de motor alcanza el valor nominal para la plena carga y baja fuertemente hasta la marcha en vacío. Las necesidades de potencia reactiva son, a pesar de ello, máximas para plena carga y mínimas para marcha en vacío, como puede verse fácilmente por medio de mediciones.

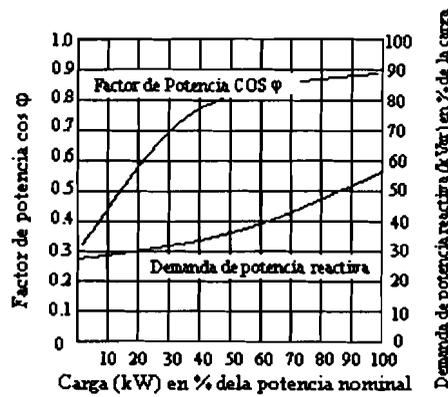
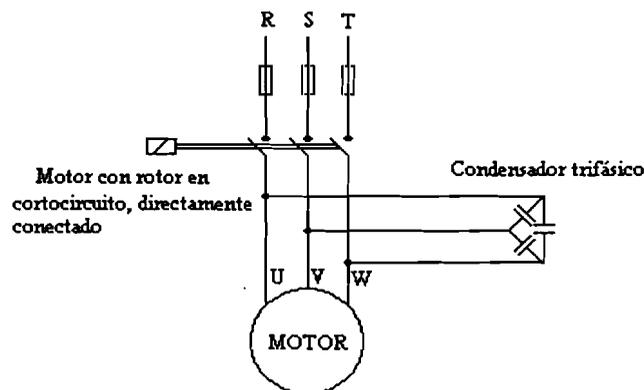


Fig. 7

- Factor de potencia y demanda de potencia reactiva de un motor asincrónico trifásico de 100 KW, sin compensación en función de su carga.

Si se quisiera mejorar el factor de potencia del motor hasta  $\cos \phi = 1$  para plena carga, se obtendría con ello un exceso de potencia del condensador para la marcha en vacío. Para evitar esto, la potencia del condensador se elige adecuadamente, no mayor que las necesidades de potencia reactiva del motor en la marcha en vacío. Entonces se obtiene en vacío un factor de potencia ( $\cos \phi = 1$ ) y para la plena carga un factor de potencia, todavía mínimo de ( $\cos \phi = 0.95$ ).

La conexión del condensador es muy sencilla cuando el motor está conectado a la red trifásica por medio de un aparato de conexión tripolar (Figura 8). el condensador trifásico se conecta sin fusible, en paralelo con los bornes del motor y no precisa ninguna resistencia de descarga, puesto que puede descargarse a través de los arrollamientos del motor.



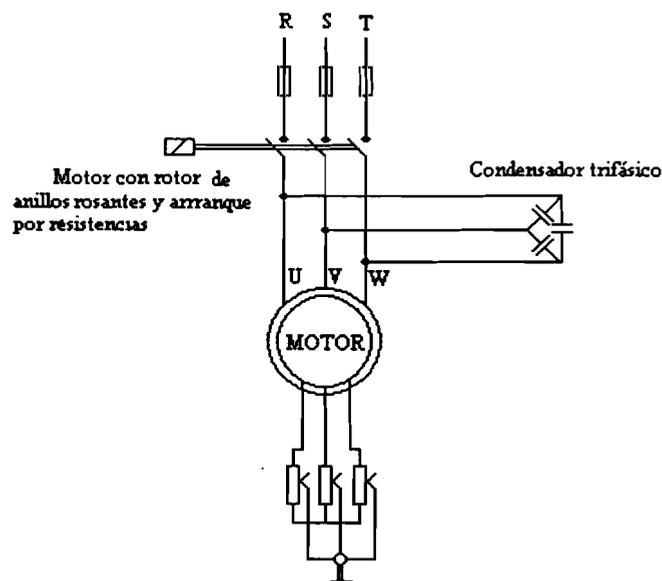


Fig. 8

La combinación “motor de inducción – condensador”, se comporta una vez desconectada de la red, de un modo fundamentalmente distinto que un motor solo. En los bornes de un motor sin condensador, la tensión desciende muy rápidamente a cero después de la desconexión, incluso si el rotor del motor sigue girando. Por el contrario en los arrollamientos de un motor con condensador acoplado, cuando el motor sigue en marcha por inercia, se induce todavía una tensión, puesto que el campo magnético del motor se mantiene aún por el condensador, a pesar de que el motor está ya separado eléctricamente de la red. En los motores grandes, que siguen girando por inercia, hasta llegar al reposo, un tiempo proporcionalmente mayor, existe por tanto cierto peligro ya que el personal cree que no ha de haber ya tensión una vez desconectado el motor.

Si se elige un condensador de potencia excesivamente grande para el motor, la tensión existente durante este período de inercia, llamada tensión de autoexcitación, podría ser incluso mayor que la tensión de la red, poniendo en peligro el aislamiento del motor, mientras que tal sobretensión no representa ningún riesgo para un condensador autorregenerativo.

- **Mejora individual del factor de potencia en los aparatos de elevación.**

Los ascensores, grúas, funiculares, etc., tienen unos frenos de electroimán, que frenan el motor tan pronto este se desconecta. Al conectar el motor, es simultáneamente alimentado el electroimán que resulta entonces el freno. El electroimán de freno, está conectado normalmente en paralelo con los bornes del motor, y si se quiere introducir adicionalmente un condensador, la condición necesaria para los frenos (que no haya tensión en los bornes del

motor), ya no se cumple. Un ascensor que descendiera, por ejemplo, no se pararía ya al desconectar el motor, con lo que podrían producirse serios accidentes.

La Figura 9 muestra la conexión correcta para un motor de ascensor, con la cual se excluye la autoexcitación del motor, y con ello, un fallo de los frenos. El condensador se conecta a través de un contactor propio, el cual a de montarse, eléctricamente, delante del interruptor de control del ascensor. Como los motores de los aparatos de elevación se conectan y desconectan con intervalos muy breves, el condensador ha de tener sus resistencias previstas para una descarga rápida.

• **Conexión del condensador para motores con conmutador estrella – delta.**

Los aparatos de conexión estrella – delta, presentan problemas especiales para instalar el condensador, ya que existe la posibilidad de que durante el paso de la posición de estrella a delta se autoexcite el motor.

Con ello, en los casos más desfavorables, pueden originarse tensiones excesivas en los arrollamientos del motor, además, es fácil que las tensiones autoexcitadas no se encuentren en sincronismo con la tensión de la red. Hoy día se encuentran ya en el mercado conmutadores estrella – delta de tipo especial que excluyen este riesgo con plena seguridad. Si se dispone de un conmutador de este tipo, el condensador trifásico con resistencia de descarga, puede conectarse de acuerdo con lo que indica la Figura 9.

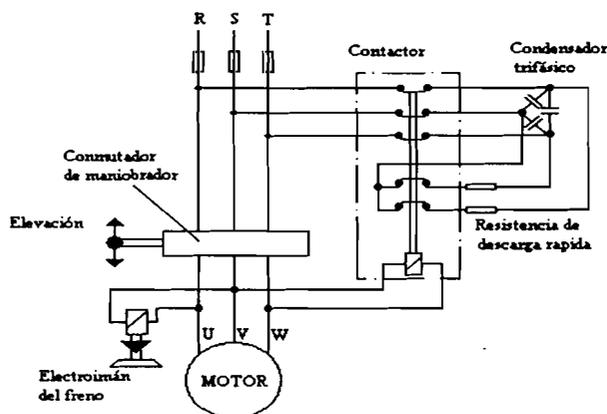


Fig. 9

También se obtiene una conexión sin problemas si el motor se hace arrancar por medio de una combinación automática de contactores. En este caso es necesario un condensador trifásico con resistencias de descarga (Figura 10).

Pero, en la práctica, es frecuente tener que corregir el factor de potencia de motores equipados con conmutadores estrella – delta normales. En este caso son posible las soluciones de la Figura 11.

En la Figura 11 se utiliza un condensador trifásico con resistencia de descarga. Al pasar de estrella a delta, es posible que se produzca una autoexcitación relativamente fuerte, pero en los motores de hasta 5 KW, no existe peligro en admitirla.

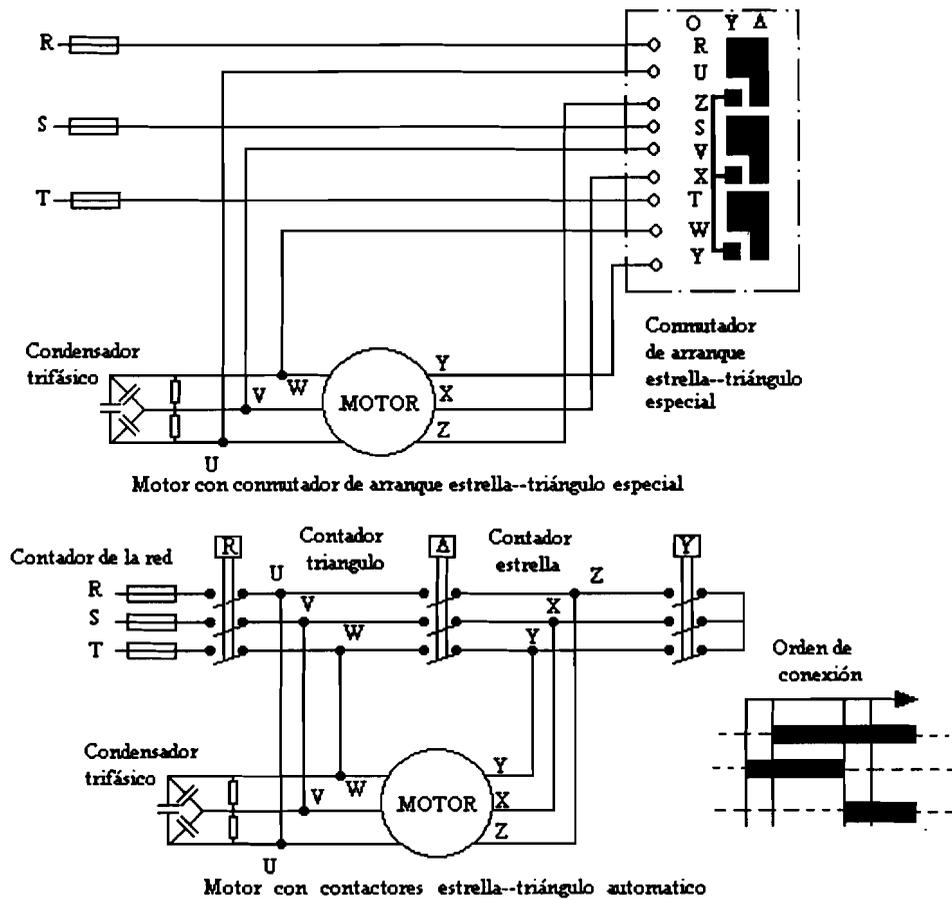


Fig. 10

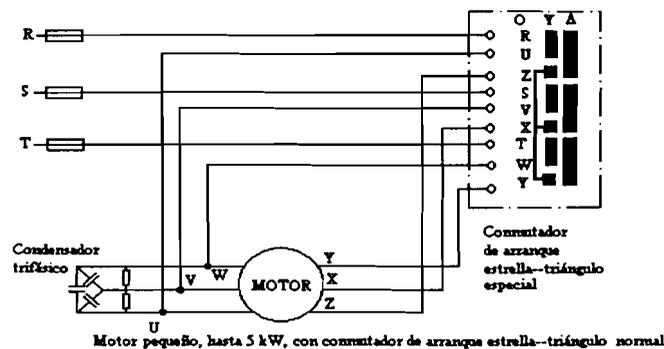


Fig. 11

En los motores mayores, se recomienda elegir un condensador trifásico del tipo de (6 bornes). En este caso, a cada una de las tres fases del motor se le conecta en paralelo, una fase del condensador. No son necesarias aquí resistencias de descarga, puesto que cada fase del condensador permanece constantemente unida con su arrollamiento del motor (Figura 12).

En esta solución, la autoexcitación que se presenta es poco importante, de forma que el método puede admitirse para motores de hasta 20 KW de potencia nominal.

En la Figura 12, se presenta un motor mediano de 5 a 20 KW, con conmutador de arranque estrella – delta normal.

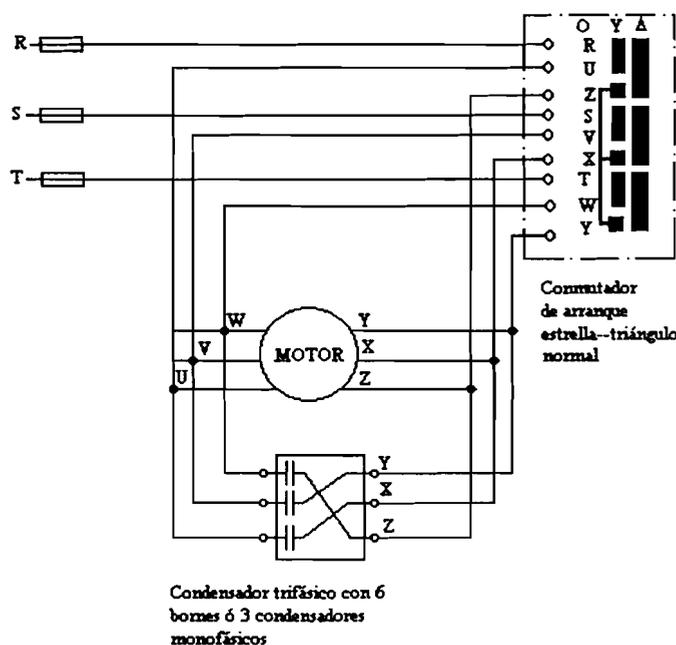


Fig. 12

Al elegir los condensadores de 6 bornes, hay que tener en cuenta que, según sea la conexión, pueden tenerse dos tensiones nominales distintas, tanto para el condensador como para el motor. La menor de estas tensiones debe ser la que coincida con la tensión de la red.

- Ejemplo 1:
- Red de tensión nominal de 380 V.
  - Motor: tensión nominal de 380 V, delta a 380/660 V.
  - Condensador: tensión nominal de 380/660 V.

- Ejemplo 2:
- Red a tensión nominal de 220 V.
  - Motor : tensión nominal de 220 V, delta a 220/380 V.
  - Condensador: tensión nominal de 220/380 V.

Cuando la potencia del motor es mayor de 20 KW, el contactor sólo debe conectarse con un conmutador adicional, una vez que el conmutador estrella – delta se halla en la posición delta (Figura 13).

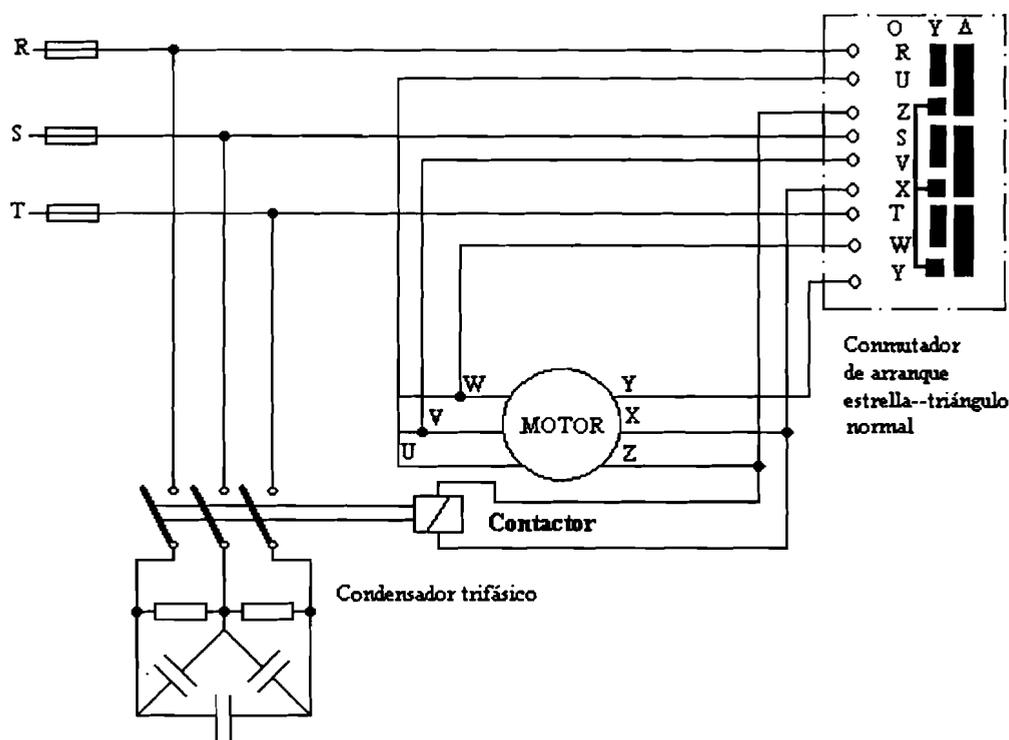


Fig. 13

**Precauciones a tomar al instalar los condensadores.**

**Conexión de los condensadores a los motores de inducción para arranque directo.**

La Figura 14 muestra las tres maneras de realizar esta conexión:

a) Después de la protección térmica del motor (Figura 14 a), el condensador se pone en servicio al mismo tiempo que el motor, siendo solo la potencia activa la que pasa por el relé térmico cuya gama de regulación será para una corriente inferior a la nominal del motor. Los KVAr necesarios, son suministrados por el condensador.

b) Antes de la protección térmica del motor (Figura 14 b), poniéndose en servicio los dos al mismo tiempo. La protección térmica será para la corriente nominal del motor. Se puede elegir esta variante cuando se trata de efectuar una compensación sin modificación alguna.

c) Conexión de los condensadores antes del arranque (Figura 14 c), la protección térmica será para la corriente nominal del motor. Esta instalación requiere un interruptor y fusibles propios para el condensador.

Cuando el motor y un condensador deben maniobrar conjuntamente, éste debe dimensionarse correctamente. En efecto, si la potencia reactiva del condensador es mayor que la potencia necesaria para magnetizar el motor, aparecen sobretensiones importantes.



### Conexión de condensadores en paralelo con un transformador de distribución.

Lo que se ha explicado para los motores de inducción, excepto el arranque, es válido también pero en menor medida para los transformadores de distribución. Si embargo, hay que tomar ciertas precauciones en lo referente a la frecuencia de resonancia. Es necesario verificar que esta frecuencia esté lo suficientemente alejada de los armónicos más comunes (orden 3 a 15). La frecuencia de resonancia se calcula con la fórmula siguiente:

$$f_r = f_o * \sqrt{\frac{P_{cc}}{P_c}}$$

de donde...

$f_r$  – frecuencia de resonancia.

$f_o$  – frecuencia de la red.

$P_{cc}$  – potencia de cortocircuito del transformador.

$P_c$  – potencia de los condensadores a instalar (en el caso de una batería adicional, sumar la potencia instalada y la nueva).

Si la frecuencia de resonancia está muy cerca de la frecuencia de un armónico, habrá amplificación. Es necesario entonces instalar filtros antiarmónicos.

- Influencia de los armónicos de línea sobre los condensadores.

Los equipos electrónicos en general, y en particular los rectificadores, tiristores, triacs, transformadores saturables, hornos de arco, etc., generan armónicos a veces elevados en la onda de tensión de una línea.

Estos armónicos afectan la característica de la red de tensión y corriente a través de la fórmula siguiente:

$$U'_{eff} = V_{effnominal} * \sqrt{1 + K^2}$$

$$I'_{eff} = I_{effnominal} * \sqrt{1 + h^2 * K^2}$$

donde:

$K$  – porcentaje de armónicos.

$h$  – orden de los armónicos.

Se ve que si el armónico contenido en la onda de tensión alcanza la amplitud  $K\%$  de la fundamental, su influencia será  $n$  veces mayor en la onda de corriente.

Como ejemplo supongamos una tensión eficaz fundamental de 100 V que tiene 40% de armónicos de orden 5, con lo cual tendremos:

$$U'_{eff} = 100 * \sqrt{1 + (0.4)^2} = 108V$$

$$I'_{eff} = 100 * \sqrt{1 + 5^2 * (0.4)^2} = 224A$$

de ello se deduce la presencia de armónicos en bornes de un condensador cuando la sobreintensidad medida es exagerada para una variación de la tensión tan pequeña. Ello nos indica que pueden presentarse dos problemas:

1. Los condensadores tienen, a estas frecuencias, una impedancia muy pequeña y pueden ser comparados a cortocircuitos sucesivos que averían los equipos electrónicos mal protegidos.
2. Los equipos electrónicos mal protegidos o sobredimensionados aceptan las sobrecargas producidas por los condensadores, pero la vida de estos queda muy disminuida por las sobreintensidades que lo recorren sobre todo en régimen no senoidal en donde pueden haber corrientes transitorias (puntas de varios miles de amperios durante varios tiempos extremadamente cortos) no detectados por los aparatos de medidas habituales.

Estos peligros pueden evitarse instalando en serie con los condensadores, unas reactancias que amortigüen la frecuencia propia del circuito hasta un valor más bajo. El coste es en general tan elevado como el de los condensadores y sus accesorios pudiendo hasta triplicar el precio inicial calculado.

La experiencia ha demostrado, no obstante, que solo se presentan el 1% de casos como estos, gracias a la configuración de la red (impedancias, cables, etc.), y los fabricantes se limitan a ofrecer y suministrar sus condensadores advirtiendo al usuario sobre la posibilidad de instalar un sistema de protección antiarmónico.

Un sistema de telemando en las líneas basado en frecuencias musicales tienen el mismo efecto, sobre los condensadores, que los armónicos. Su principio se basa en el empleo de un alternador de frecuencia media que, gracias a un transformador apropiado, superpone a la tensión alterna de 50 Hz de la red, una tensión de MF de amplitud 5% fundamental. La inyección de una señal MF en la red durante un tiempo muy corto, por ejemplo, para excitar los relés de mando de los contadores, pero la presencia de éstos perturba el funcionamiento de los relés de mando a distancia excitados a frecuencias medias. Las frecuencias musicales actúan pues como cortocircuitos para los condensadores, causando caídas de tensión inadmisibles para los relés. La solución consiste en colocar antes de los condensadores, circuitos para aumentar la impedancia a la frecuencia de telemando.

### Selección del condensador.

Podemos recurrir al cálculo directo tomando los datos de la placa del motor, pero para mayor facilidad, podemos recurrir a la tabla 3, en la que se dan los valores de potencia de los condensadores necesaria, para compensación de motores asincrónicos.

### Desconexión.

La potencia reactiva en vacío puede ser calculada por la expresión siguiente:

$$Q_L = 1.73 * 10^{-3} * I_o * V$$

siendo  $I_o$  la intensidad en vacío del motor y  $V$  su tensión nominal en voltios.

### Condensadores para transformadores.

La demanda de potencia reactiva de los transformadores normales representa en vacío aproximadamente del 4 – 6 % y a plena carga, del 8 – 12 % de la potencia nominal del transformador. Dentro de estos límites, la potencia reactiva depende de la potencia nominal y de la tensión nominal del primario del transformador. Con ayudas de la Figura 2.17, es fácil determinar la potencia de los condensadores, adecuada para cada transformador, que cubre la demanda de potencia reactiva del transformador cuando funcionan normalmente, y no representa ninguna carga capacitiva de importancia durante el funcionamiento en vacío del transformador.

### Incremento del voltaje a causa de la conexión de condensadores.

Todos hemos oído decir que los condensadores elevan el voltaje de línea a la cual se encuentran conectados. Ahora veremos la forma de poder calcular aproximadamente, cuanto va ha elevarse el voltaje a causa de la conexión de nuestro banco de capacitores.

Veamos el caso de un banco de condensadores conectado al final de un conductor cuya resistencia en este momento consideraremos despreciable, el cual se muestra en la figura.

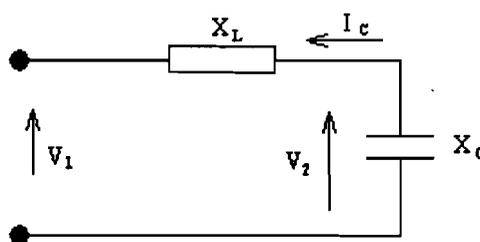


Fig. 15 Conexión esquemática de un condensador a través de una inductancia  $X_L$ .

en este caso, el voltaje a través de  $X_L$  será:

$$V = I_c \cdot X_L$$

Donde:

$I_c$  – corriente capacitiva.

$X_L$  – reactancia inductiva de la línea.

Como apreciamos anteriormente, la corriente inductiva tiene la misma dirección, pero sentido contrario a la capacitiva. Esto equivale a decir que ambas corrientes tienen signos diferentes, por tanto, este voltaje que aparece en la resistencia producto de la corriente capacitiva, tiene carácter de elevación y no de caída. De manera que podemos decir que el incremento de voltaje en tanto por ciento será:

$$\Delta V\% = \frac{I_c \cdot X_L}{V_2} \cdot 100$$

Si multiplicamos el numerador y el denominador por  $V_2$  tendremos:

$$\Delta V\% = \frac{V_2 \cdot I_c \cdot X_L}{X_L} \cdot 100$$

Esta expresión puede escribirse de la forma siguiente:

$$\Delta V\% = \frac{V_2 \cdot I_c}{\frac{V_2^2}{X_L}} \cdot 100$$

donde:  $V_2 \cdot I_c = CKVA$

$$\frac{V_2}{X_L} = KVAR_L \text{ (consumo propio línea)}$$

De manera que la elevación aproximada de voltaje ocasionada por un condensador conectado en la línea no es que:

$$\Delta V\% = \frac{CKVA}{KVAR_L} \cdot 100$$

Es decir, que en líneas donde la resistencia del conductor pueda despreciarse con respecto a su reactancia, la elevación relativa del voltaje es igual al cociente resultante de dividir los KVA capacitivos conectados, entre la demanda de reactivo propio de línea.

Este método da resultados aproximados aceptados en el caso de las líneas aéreas.

Veamos ahora el caso en que tenemos que considerar la resistencia del conductor. La figura 16 muestra el diagrama vectorial para este caso.

Tanto la caída como la elevación de voltaje tienen una componente en fase con la corriente que la provoca y una componente perpendicular a la misma  $R \cdot I_c$  y  $X_L \cdot I_c$

respectivamente, en la figura mediante el empleo de las que ya conocemos, como queremos ahora introducir la componente resistiva, decimos que:

$$\Delta V\% = \frac{I_c \cdot Z \cdot \text{Sen}\phi}{V_2} \cdot 100$$

observe en la figura que la elevación real de voltaje es un poco mas pequeña que la calculada por este método y que a medida que la resistencia se va haciendo mas pequeña, mas nos aproximamos al valor real.

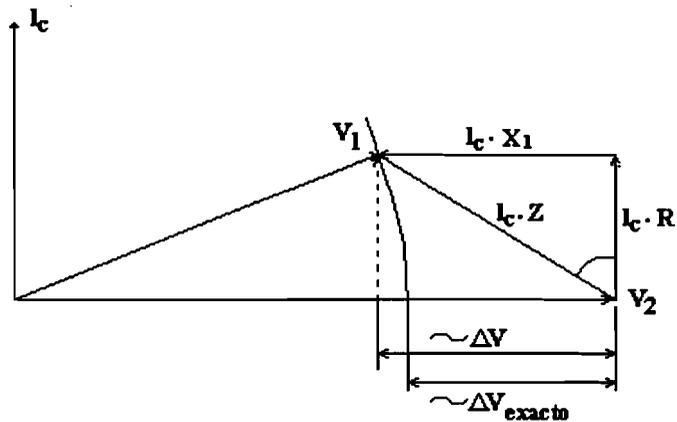


Fig. 16 Diagrama vectorial de la elevación de voltaje producida por un condensador conectado a través de una reactancia inductiva \$X\_L\$.

Al multiplicar por \$V\_2\$ el numerador y el denominador de la expresión anterior:

$$\Delta\% = \frac{CKVA}{KVA_L} \cdot 100\% \cdot \text{sen}\psi$$

donde:

CKVA – cantidad de condensadores conectados.

KVA<sub>L</sub> – potencia aparente propia que demanda la línea.

\$\psi\$ - ángulo de la impedancia de la línea.

Se instala un banco de 150 CKVA en una línea de 2400 V a tierra, cuya resistencia es igual a 5 ohm y su resistencia inductiva es a 10 ohm. Calculemos la elevación de voltaje que las mismas producen:

$$CKVA = \frac{150}{3} = 50 \text{ a causa de que estamos trabajando con cantidades de fase.}$$

$$V_n = 2400 \text{ V}$$

$$R=5 \text{ ohm}$$

$$X_L=10 \text{ ohm}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{5^2 + 10^2} = 11,2 \text{ ohm}$$

$$\tan \psi = \frac{X_L}{R} = \frac{10}{5} = 2$$

$$\psi = 64^\circ$$

$$\text{sen } 64^\circ=0.9.$$

si se emplea la relación:

$$\Delta V\% = \frac{I_L \cdot Z \cdot \text{sen } \psi}{V_2} \cdot 100 = \frac{50}{520} \cdot 0.9 \cdot 100 = 8.65\% \text{ por fase.}$$

Hallamos ahora el incremento por el método aproximado de la relación:

$$\Delta V\% = \frac{CKVA}{KVAr_L} \cdot 100$$

$$CKVA=50$$

$$KVAr_L = \frac{(2400)^2}{X_L} \cdot \frac{1}{1000} = \frac{(2400)^2}{10000} = 580$$

$$\Delta V\% = \frac{50}{580} \cdot 100 = 8.62\% \text{ por fase.}$$

Como se puede utilizar ambos métodos, la diferencia obtenida en los valores finales es despreciable. Esto es de esta manera mientras el valor de R sea menor que  $\frac{X_L}{2}$ .

Veamos ahora cual es la elevación de voltaje en el enrollado secundario de un transformador, ocasionado por la conexión de un banco de capacitores conectado cerca de los bornes del primario para mejorar el factor de potencia.

En este caso, como la resistencia del enrollado secundario del transformador, es pequeña comparada con la resistencia inductiva del mismo, podemos considerar que estamos frente al caso que se muestra penúltimo.

$$\Delta V\% = \frac{I_c \cdot X_{Tr}}{V_2} \cdot 100\%$$

expresemos el valor de la resistencia  $X_{Tr}$  del secundario del transformador en función de su tanto por ciento de impedancia:

$$X_{Tr} = \frac{X\%}{100} \cdot \frac{V^2}{KVA_n \cdot 1000}$$

Si se sustituyen las expresiones anteriores, y se multiplican el numerador y el denominador por  $V_2$  se obtiene:

$$\Delta V\% = \frac{CKVA}{KVA_n} \cdot X\%$$

donde:

CKVA – capacidad de los condensadores conectados.

KVA<sub>n</sub> – capacidad del banco de transformadores.

Ejemplo: se conecta un banco de condensadores de 75 CKVA en una industria alimentado por un banco de transformadores de 300 KVA. La reactancia en tanto por ciento tomada de los datos de chapa es 3.5 %. La elevación de voltaje en el enrollado secundario del transformador será:

$$\Delta V\% = \frac{75}{300} \cdot 3.5 = 0.87\%$$

Generalmente, la elevación de voltaje que los condensadores producen en la industria de acuerdo con los valores más usuales de reactancia en tanto por ciento, capacidad nominal y capacidad KVA capacitiva, oscila entre 1 % y 5 %.

Tendremos que señalar, que estos valores calculados son independientes de la carga aplicada. Se producen en los terminales de líneas y bancos de transformadores en vacío, y el aumento real es la suma algebraica de la caída de voltaje antes de la conexión de los condensadores, más la elevación que el mismo produce. Téngase en cuenta que los valores calculados son todos valores de fase.

#### **Influencia del motor asincrónico en el consumo de energía reactiva.**

A continuación hablaremos sobre la fuente más importante de energía en la industria: motor de inducción.

Para que el motor de inducción funcione, es necesario mantener su campo magnético giratorio, aún cuando el motor esté girando en vacío sin efectuar ningún trabajo. Esto hace que este equipo se convierta en el consumidor de energía reactiva más importante de las instalaciones industriales.

El consumo de energía reactiva de un motor depende de:

1. Grado de utilización del motor: existe la opinión de que el motor en vacío consume más energía reactiva que a plena carga. Esto no es cierto, la demanda en KVA reactivo del motor de inducción es mayor a plena carga que en vacío. Sin embargo, en vacío o con poca carga, la relación entre la demanda reactiva y la demanda real es más desfavorable que a plena carga. Lo expuesto se puede apreciar en la figura, allí se verá que en condiciones de vacío la demanda real  $P_0$  es pequeña en comparación con la demanda reactiva  $Q_0$ , el ángulo  $\phi_0$  es grande y, por lo tanto, el factor de potencia es bajo.

En condición de plena carga vemos que la relación de la demanda real  $P$ , con respecto a la demanda reactiva  $Q$ , es más favorable que en la condición anterior, el ángulo  $\phi_1$  más pequeño, y por lo tanto, el factor de potencia mayor. Note que la demanda reactiva  $Q$  es mayor a plena carga.

En la figura 18 “gráfica tabulada”, muestra variaciones típicas del tanto por ciento de la demanda reactiva, en función del tanto por ciento de carga, referidos ambos a la potencia nominal real o efectiva en KW. Como dato interesante podemos notar que el consumo de energía reactiva a plena carga es solo de 20 % a 30 % mayor que el consumo en vacío. Esto se debe a que al aumentar la corriente, aumente el flujo disperso en los cabezales de las bobinas, hay más líneas magnéticas que se cierran a través del aire y, por tanto, aumenta un poco el consumo de energía reactiva.

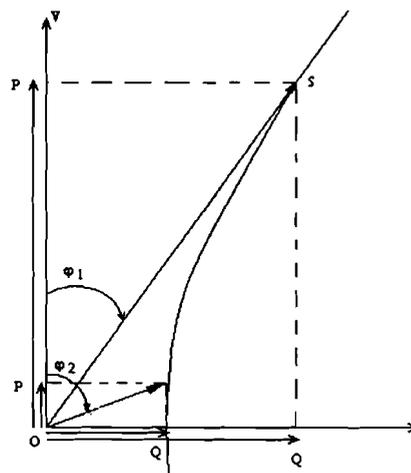


Fig. 17 Diagrama vectorial que muestra la variación de la corriente, la potencia real e inductiva en función de la carga

Este hecho se aprovecha para la compensación individual del factor de potencia, independientemente de la carga que pueda llevar el motor en un momento dado, de manera que este cálculo, se pueda hacer sin necesidad de realizar ningún tipo de medición, solamente utilizando los datos de chapa del motor.

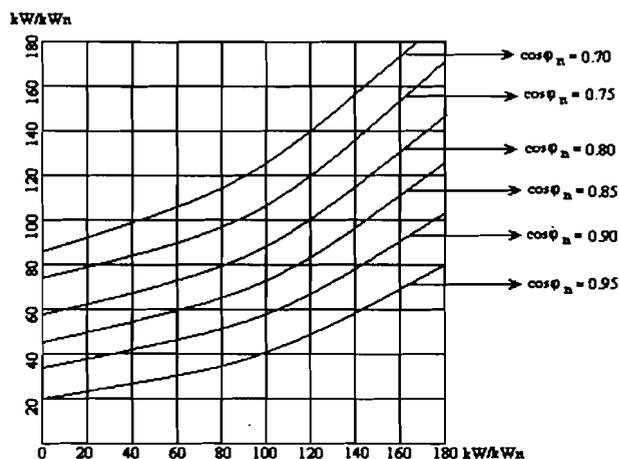


Fig. 18 Demanda específica de potencia reactiva en motores trifásicos de inducción en función de su carga.

Para la reducción del voltaje a los equipos hay tres métodos fundamentales:

- a) Mediante la manipulación de los taps o derivaciones de los transformadores que alimentan la industria.
- b) Con un cambio de conexiones que tiendan a reducir el voltaje secundario entregado.
- c) Mediante la conexión de las bobinas del motor.

La reducción del voltaje mediante la reducción o manipulación de las derivaciones es posible en el caso en que los transformadores que alimentan la industria o unidad consumidora cuenten con derivaciones para bajar voltaje, lo que no siempre es de esta manera.

En resumen, existen varias formas de limitar y controlar la demanda reactiva en los motores de inducción. Estas formas son las siguientes:

- Mediante la limitación del giro en vacío de los motores, con dispositivos automáticos o con la intervención del operador.
- Mediante la conexión de condensadores estáticos al circuito del motor, individualmente o en grupo.
- Mediante la reducción del voltaje aplicado a sus bornes o de utilización.
- Con el cambio del motor por otro de menor capacidad, de manera que este concuerde con la carga que la máquina demanda.

2. Tamaño del equipo: la demanda reactiva crece, según sean de mayor capacidad los motores empleados. Sin embargo, aunque crece la demanda en valor absoluto, trabajan con un factor de potencia más alto, ya que el tamaño relativo del entrehierro, comparado con el tamaño total del equipo, es menor que en motores más pequeños. Por este motivo, el factor de potencia de los equipos de mayor capacidad, y por tanto, mayores en tamaño, también es mayor que el de los equipos pequeños, y por tanto, de menor capacidad.

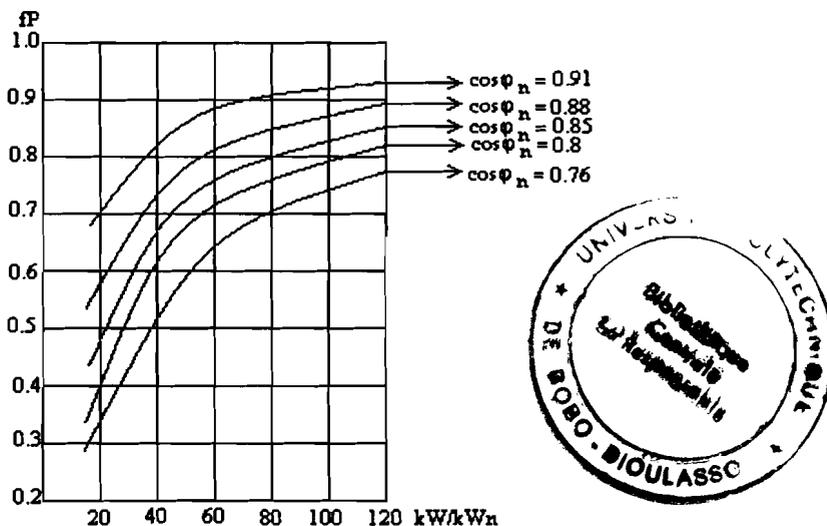


Fig. 19 Variación del factor de potencia en función de la carga en motores trifásicos de inducción con diferentes factores de potencia nominales.

3. Número de polos: mientras mayor sea el número de polos del motor, más bajo será su factor de potencia de chapa o nominal. Esto se debe a que las líneas magnéticas tienen que cerrarse un número de veces mayor a través del aire del entrehierro, lo cual da como resultado que el factor de potencia de plena carga de los equipos con varios pares de polos, sea más bajo que el de los equipos que el de los equipos que tienen un solo par de polos.

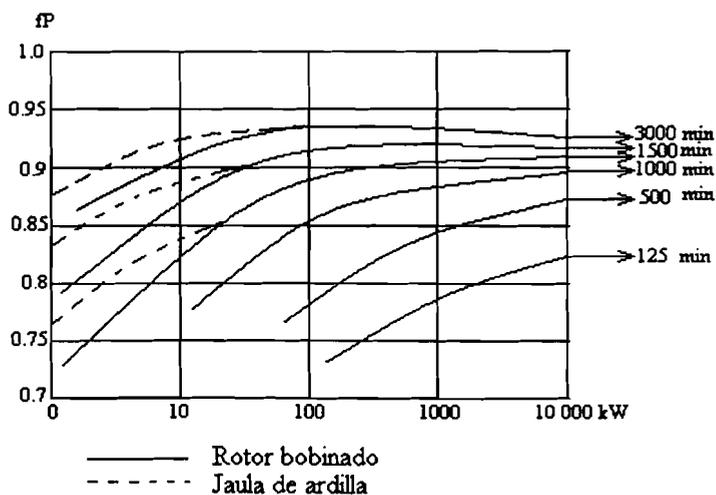


Fig. 20 Factor de potencia nominal típico de motores trifásicos de distintas capacidades y revoluciones por minuto.

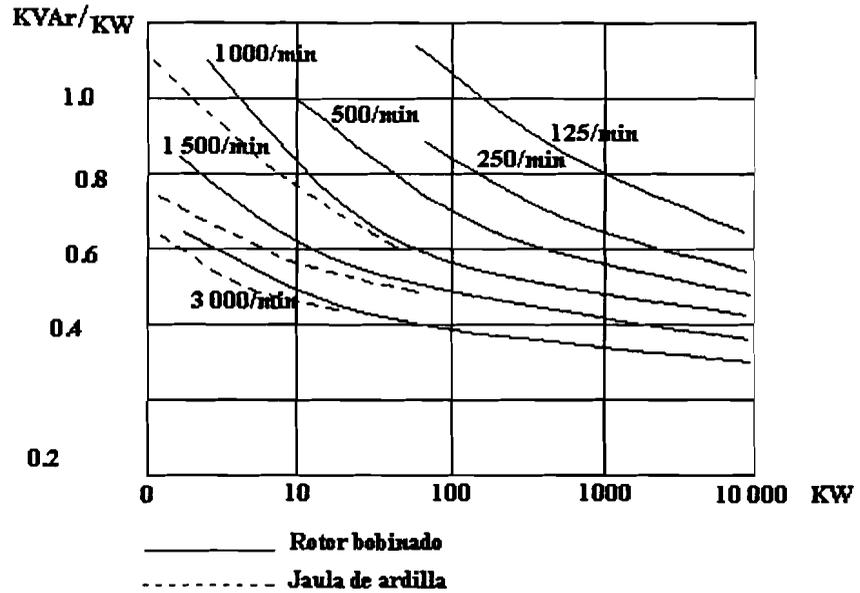


Fig. 21 Demanda específica de energía relativa en función de su potencia nominal en motores de distintas revoluciones por minutos.

Muestran como varía el consumo de reactivo y el factor de potencia en función de la capacidad del motor, para distintos números de revoluciones.

Note que el consumo de reactivo de los motores de jaula de ardilla es menor que el de los motores de rotor bobinado hasta 100 KW, aproximadamente. Lo expuesto anteriormente se debe a que el motor de jaula de ardilla es más compacto que el de rotor bobinado y, por tanto, los flujos dispersos son menores en el primero. Al haber más vueltas de alambre en el rotor, los flujos dispersos son mayores a través del aire, lo cual da como resultado que la demanda reactiva en este caso sea mayor.

4. Momento máximo del motor: los valores de gran momento máximo se diseñan para valores de inducción más altos, por lo que el consumo de energía reactiva en estos motores, es mayor por cada kilowatt entregado en el eje, lo que va en detrimento del factor de potencia.

La mala utilización del motor o su reparación deficiente, pueden llevar a un incremento en el consumo de energía reactiva, a causa de un enrollado incorrecto, o por su agrandamiento intencional del entrehierro para evitar rozamientos, en caso de mala alineación o de chumaceras o rolletes defectuosos.

# Capítulo V

## CAPITULO V Ejemplos.

### 5.1 Ejemplo de cálculo de la potencia reactiva mediante un estudio de energía eléctrica.

Existen varias empresas en el mercado que realizan el estudio de energía eléctrica, las cuales efectúan estudios instalando un registrador en el punto de alimentación, registrando los KW, KVA<sub>r</sub> y el factor de potencia.

El registro se hace en intervalos de 15 minutos y puede ser hecho por períodos de tiempo de días, semanas y meses. Al final de dicho período se obtiene un listado con los valores puntuales registrados y las gráficas correspondientes.

En este tipo de estudio no se requiere realizar ningún cálculo adicional para el dimensionamiento del banco de capacitores ya que la magnitud de este se puede leer directamente de los gráficos del listado.

#### Ejemplo de aplicación práctica.

Este ejemplo se basa en un estudio realizado por la compañía SAKATA INGENIEROS mediante la instalación de un equipo registrador de energía por un período de 15 días a una planta molinera. Como resultado de dicho estudio, se dimensionará un banco de capacitores de 140 KVA<sub>r</sub> aproximadamente.

Al ser la potencia reactiva mayor que 10 KVA<sub>r</sub>, se opta por plantear una solución al problema mediante la instalación de un banco de capacitores regulados en forma automática y adicionalmente realizar compensación individual a las máquinas de mayor potencia.

La propuesta planteada fue la siguiente:

- **Objeto:** la siguiente propuesta corresponde al suministro e instalación de un sistema de energía reactiva, el cual, instalado en el sistema eléctrico, permitirá corregir el factor de potencia.
- **Propuesta técnico-económica:** tablero de capacitores de 87 KVA<sub>r</sub>, de compensación automática, de dimensiones aproximadas de 900x600x1800 mm. El lado izquierdo adosado al tablero de distribución principal y provisto de sus pernos de unión. El lado derecho provisto con secciones de malla para permitir el enfriamiento de los capacitores.

Para el montaje de fusibles y contactores, se tienen previsto dos placas metálicas frontales. Los capacitores serán montados en la parte posterior de la placa, dispuestas en dos repisas.

El tablero estará compuesto de:

1. Un interruptor termomagnético de 50 ampérios 45 KA de 230 V trifásico.
2. Un banco de capacitores fijos de 15 KVAR.
3. Cinco juegos de portafusibles y fusibles NH de 63 ampérios.
4. Cuatro bancos de capacitores de regulación de 15 KVAR.
5. Un banco de capacitores de regulación fina de 12 KVAR.
6. Un relé de factor de potencia.
7. Accesorios varios como aisladores, barras de 60x6 mm<sup>2</sup>, cables con terminales, fusibles para el control, borneras, etc.

El tablero para compensación individual, será de dimensiones aproximadas de 600x600x1800 mm<sup>3</sup>, como lateral derecho provista con secciones de malla para el enfriamiento de los capacitores. Provisto con placa frontal de montajes de contactores.

Dicho tablero estará compuesto por:

1. Dos bancos de capacitores de 15 KVAR (molino 1 y 2).
2. Dos contactores.
3. Cuatro bancos de capacitores de 5 KVAR (molinos y mezcladores 1, 2 y 3).
4. Cuatro contactores.
5. Cuatro relés auxiliares con dos contactos NA (normalmente abierto).
6. Seis juegos de fusibles y portafusibles de 6 ampérios.
7. Accesorios varios como cables, terminales y borneras.

Compensación individual de 9 KVAR para mezcladora y será instalado en el gabinete existente y está compuesto de lo siguiente:

- Un contactor.
- . Un banco de condensadores de 9 KVAR.
- . Un relé auxiliar con dos contactos NA.
- . Un juego de fusibles y portafusibles.
- . Un contactor
- . Un banco de condensadores
- . Un relé auxiliar con dos contactos NA
- . Un juego de fusibles y portafusibles DZ
- . Accesorios varios como perfiles y placa de montaje, cables, terminales, borneras.

## 5.2 Elección del tipo de compensación.

Debemos definir dos tipos de compensación.

Compensación fija: Consta de una batería de condensadores de un valor constante de potencia reactiva, la cual puede ser de funcionamiento manual(mando por interruptor) semiautomática(mando por contactores) o directo(conectando directamente a los bornes del receptor).

Su utilización es principalmente en receptores de tipo inductivo, motores y transformadores, también se los puede utilizar en la compensación por grupos(tableros seccionales), donde no haya grandes variaciones de potencia reactiva.

Compensación automática: Consta de un conjunto de baterías de condensadores de potencia unitaria y suministra la potencia reactiva según varíe la carga, o lo que es lo mismo, el factor de potencia de la instalación. El comando de la conexión y desconexión de las baterías es comandado por un relé de control varimétrico (mide la potencia reactiva de la instalación) el comando de los condensadores se efectúa por contactores diseñados especialmente para la conmutación de condensadores y en general los pasos(escalones de potencia) son el mismo valor, por ejemplo una batería de compensación automática de 200 KVAR ésta formada por 4 baterías de KVAR cada una(5 x 40). Este tipo de compensación tiene su principal utilización cuando debe realizarse la compensación global (en el tablero general) en el caso de tener grandes salidas o tableros seccionales de cargas variables.

La tabla 1, sirve de guía para la elección entre uno u otro tipo, donde,  $Q_c$  es la potencia de la batería (en el caso de compensación global) y  $S_n$  la potencia del transformador de alimentación.

Tabla 1.

Clase de instalación	Información para determinar $Q_c$	Modo de compensación	Tipo de compensación
Caso general	Factor de carga del sistema	Global	Fija sí $Q_c/S_n \leq 15\%$ automático
Instalación con varios sectores distribuidos	Factura o potencia del sistema	Por sectores	Automática fija
Grandes receptores	Factor de sistema	Individuales	Fija

## 5.3 Elección del rango del condensador

electrónicos, que junto a los equipos de iluminación fluorescentes y otros aparatos, generan armónicos en la red, es decir, deforman la onda de tensión y como consecuencia la corriente que toman los condensadores de la red. Estos armónicos, a su vez, pueden causar una sobrecarga sobre el condensador, pudiendo causar su destrucción.

Una guía práctica desarrollada por MERLIN GERIN, para ayudar al instalador a elegir la solución más adecuada sin necesidad de realizar cálculos complejos, tiene en cuenta la importancia de la potencia de las fuentes generadoras de armónicos (rectificadores, variadores de velocidad, etc.)  $G_h$  con respecto a la potencia del transformador o fuente  $S_n$  o potencia de cortocircuito aguas abajo de transformador  $S_{cc}$ , del lado de baja tensión (BT), como la figura 1. La elección se expresa más abajo, en las tablas 2.a y 2.b.

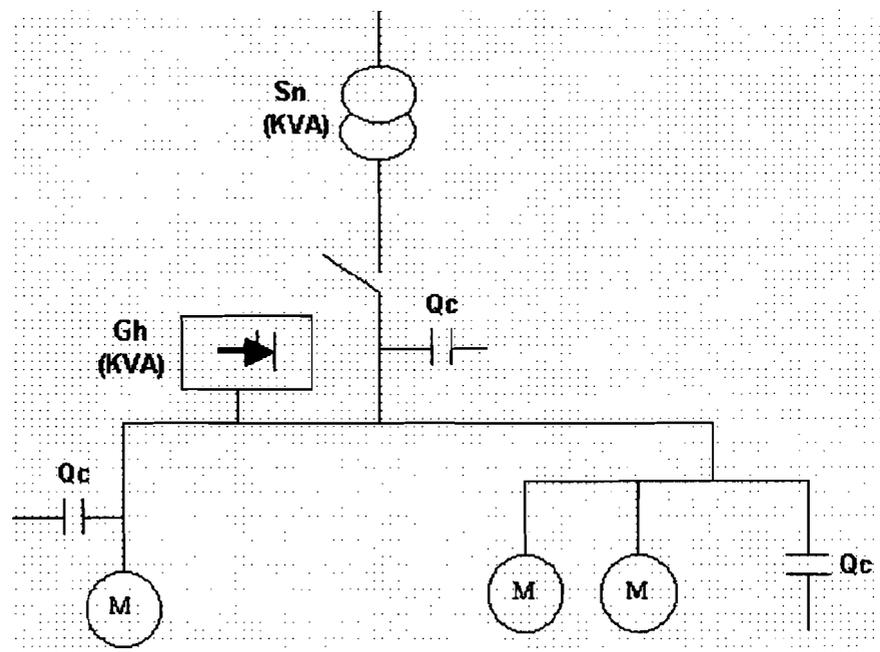


Fig. 1.

Se disponen las siguientes soluciones

- . Condensadores rango standard
- . Condensadores sobre aislados rango H
- . Condensadores sobre aislados con reactores antiarmónicos (DR O SAH)
- . Condensadores sobre aislados rango H Y filtro

Tabla 2.a: potencia del transformador SN 2 MVA(regla simplificada)

Clase de red	GH/SN	Rango de la batería
Normal	$GH/SN \leq 15\%$	Rango standard
Deformada	$15\% < GH/SN \leq 25\%$	Rango H
Altamente deformada	$25\% < GH/SN \leq 60\%$	Rango H +DR o SAH
Extremadamente deformada	$GH/SN > 60\%$	Filtro y rango H

Tabla 2.b. Potencia del transformador SN>2MVA(regla general) pag.87

Clase de red	GH/SN	Rango de batería
Normal	$GH < Scc/120$	Rango estándar
Deformada	$Scc/120 \leq GH \leq Scc/70$	Rango H
Altamente deformada	$Scc/70 \leq GH \leq Scc/30$	Rango H +DR O SAH
Extremadamente deformada	$Scc/30 < GH$	Filtros y rango H

**Veremos algunos ejemplos de aplicación**

A) potencia nominal del transformador SN=2500 KVA tensión de corto circuito=7%  
 suma de la potencia de los rectificadores GH=250KVA

Usando la tabla 2.b.

$$Scc = 2500 \times 100/7 = 35714 \text{ KVA}$$

$$Scc/120 = 298 \text{ como } Gh \leq Scc /120$$

La solución es utilizar condensadores estándar.

b- potencia nominal del transformador Sn =2500 KVA

tensión de corto circuito = 7%

Suma de la potencia de los rectificadores: GH = 400KVA

usando la tabla 2B

$$Scc = 2500 \times 100/7 = 35714 \text{ KVA}$$

$$Scc/120 = 298$$

$$Scc/70 = 510 \text{ como } Scc /120 \leq GH \leq Scc/70$$

la solución es utilizar condensadores sobre aisladores RANGO H

c)Potencial nominal del transformador SN=630 KVA

$$\begin{aligned} & \text{SN} \\ & 0.25 \text{ SN} < \text{GH} < 0.6 \text{ SN} \\ & = 0.4 \end{aligned}$$

La solución es utilizar condensadores sobre aisladores con reactores antiatómicos.

### 5.4 Estudio de consumo eléctrico(MANELSA)

Para realizar el estudio y determinar el factor de potencia se utiliza un analizador de redes el cual suministra datos precisos de los consumos de la red obteniendo valores de tensión, intensidad, potencias activa y reactiva, factor de potencia y consumo de energía. Toda esta información se analiza y sirve para seleccionar las diferentes alternativas posibles de los bancos de condensadores necesarios para lograr disminuir de energía reactiva y mejorar el factor de potencia, lo cual es fundamental en la actividad industrial ya que reduce los costos de operación y evita la sobre carga de todo el sistema.

A continuación presentamos un ejemplo práctico

A la medición de un horno de inducción en un lapso de dos días, el horno realiza las coladas continuas, se obtuvo las siguientes lecturas.

Tabla 3.

Horno	Máx	Tensión	Intensidad	P. activa	P. reactiva	F.
		(V)	(A)	(KW)	(KVAr)	potencia
		448.6	448.6	235	487	0.43
	Mín	410.5	410.5	29	37	0.62

Los valores de consumo de energía también son capturados por el analizador, a continuación observamos el cuadro.

Tabla 4.

	E. activa	E. reactiva	Relación
Día 1	2470.8	3623.3	146.7 %
Día 2	2532.2	2873.4	111.6 %

Observando las tablas de consumo de energía reactiva, se propone la instalación de un banco de automática de condensadores de 200 KVA, con el cual lograríamos una disminución de la energía reactiva y elevando el valor del factor de potencia a 0.98.

Para esta elección observamos el gráfico la energía reactiva, el cual se trata de corregir los

se realiza cada 20 KVAR debido a que el gráfico presenta variaciones de aproximadamente 20 KVAR, el banco se presenta de la siguiente manera.

1 paso .....20KVAR

4 pasos .....40KVAR/220KVAR

luego se realiza una simulación a través de un programa de computadora y se logra una compensación de energía reactiva y se presenta en gráficos para su comparación, evidentemente se observa una disminución del consumo de energía reactiva y los valores del factor de potencia aumentan para lograr una compensación global de toda la red.

El costo del banco de condensadores se analiza contra el valor facturado de consumo de energía reactiva y se analiza un cálculo del tiempo de recuperación de la inversión, el valor aproximado de un banco automático de esa capacidad es de:

Costo del banco automático de 220 KVAR U.S.D. \$ 5500.00

Se calcula un promedio del consumo de energía activa y reactiva del tiempo de medición y obtenemos los siguientes valores.

Tabla 5.

Promedio	1 día	30 días
E. activa	2522.98	75689.4
E. reactiva	3248.35	97450.5

Se calcula el costo de la energía reactiva(sobre el 30% de la energía activa)

30% de energía activa =22706,82(mensual)

Energía reactiva - 30% de energía activa =Exceso de energía reactiva.

97450.5 - 22706.82 =74743,68(mensual)

Exceso de energía activa \* factor CER (costo por energía reactiva)

74743,68 \* 0.036 =\$2690.77

U.S.D \$ 116,5483

Ahora se realiza un pequeño calculo del tiempo de recuperación de la inversión dividiendo el valor del banco entre el costo de exceso de energía reactiva.

Costo aproximado del banco automático de condensadores /costo del exceso de energía reactiva.

El tiempo que la industria recupera la inversión del condensador en un corto plazo como podemos observar.

# Conclusiones

---

## CONCLUSIONES

Consideramos que este trabajo contiene un estudio muy amplio y preciso de los métodos del mejoramiento del factor de potencia en la industria. En el se encuentran consideraciones técnicas y prácticas como aumentar o bajar el mismo.

También el trabajo cumplió con las metas trazadas, al proyectar una instalación, diseñarla con equipos adecuados para que el factor de potencia sea lo más próximo posible a la unidad, ya así la industria ahorra la energía eléctrica, al mismo tiempo también el país, pues el factor económico es de suma importancia mundial.

# Recomendaciones

## RECOMENDACIONES

Debido a la importancia que concedemos a este trabajo, recomendamos lo siguiente:

- \_ Que se usa como manual en la asignatura de suministro eléctrico II
- \_ Que se incorporen a este trabajo todos los adelantos que continuamente se obtienen en esta rama, para mantener su actualización
- \_ Que el mismo sea publicado
- \_ Buscar los equipos registradores de la actualidad, de alta tecnología para mas precisión en la medición

# Bibliografía

## BIBLIOGRGAFIA

1. ARAKI, EDUARDO. Consideraciones fundamentales de un sistema de mejoramiento del factor de potencia. /Eduardo Araki.--Madrid: Ed. Sakata Ingenieros S.A., [s.a].--[s.p].
2. BARRETO GARCIA, RAFAEL. Potencia reactiva en los sistemas electroenergéticos. /Rafael Barreto García.--Ciudad de la Habana: Ed. Científico técnica, 1983.--103p.
3. BENIGNO PEREZ, CARRILLO. Diseño de instalaciones de baja tensión. /Carrillo Benigno Pérez, Jesús Guerrero Stracha Carrillo, José Ramón de Andrés Díaz.--Málaga: Depósito legal, 1992.--198p.
4. D. L., BEEMAN. Industrial power systems handbook. /Beeman D. L.--Estados Unidos: Ed. Mc Graw Hill Book, 1955.--[s.p].
5. GERIN, MERLIN. Baterías de condensadores de baja tensión. /Merlin Gerin.--[s.l],[s.n], [s.a].--[s.p].
6. GUGLIANDOLO, FILIPPO. Condensadores una solución fácil económica y segura para mejorar el factor de potencia. /Filippo Gugliandolo.--Madrid: [s.n], [s.a].-[s.p]
7. KERCHNER, RUSSEL. Alternating current circuits. /Russel Kerchner --New York: Ed. John Wiley and sons inc, 1950.--[s.p].
8. R. VALDES, NELSON. Métodos para determinar el factor de potencia y el calculo del mismo. /Nelson R. Valdes.--[s.l],[s.n],[s.a].--[s.p].
9. TANAKA, FERNANDO. Estudio de energía eléctrica. /Fernando Tanaka.--Madrid: Ed. Sakata Ingenieros S.A., [s.a].--[s.p].
10. ZABORSKI, JOHN. Electric power transmission. /John Zaborski.--La Habana: Ed. Revolucionaria, [s.a].--[s.p].

RA  
AA  
E  
C  
E  
E  
E  
E  
AT  
AS

Anexos

**SUGESTED WIRE, SWITCH, AND MOLDED CASE CIRCUIT BREAKER SIZES FOR USE WITH CAPACITORS**

**240 Volt 3 $\phi$ /60 hertz**

Kvar Rating		Rated Current		Wire size 75° C Cu (▲)		Fuse Amperes (●)		Fusible Switch Amperes (★)		Molded Case Circuit Breaker Amperes (■)	
				240 V	208 V	240V	208V	240V	208V	240V	208V
240V	208V	240V	208V	240 V	208 V	240V	208V	240V	208V	240V	208V
2.5	1.08	5.0	5.2	14	14	10	10	30	30	15	15
5	3.75	12.0	10.4	12	14	20	20	30	30	20	15
7.5	5.63	16.0	15.6	10	10	30	30	30	30	25	25
10	7.51	24.1	20.6	8	10	40	35	60	60	35	30
12.5	8.39	30.1	26.1	8	8	50	45	60	60	45	35
15	11.3	36.1	31.3	8	8	60	50	60	60	50	45
17.5	13.1	42.1	36.5	6	8	70	60	100	60	60	50
20	15.0	48.1	41.7	6	6	80	70	100	100	70	60
22.5	16.9	54.1	46.9	4	6	90	80	100	100	80	70
25	18.8	60.1	52.1	4	4	100	80	100	100	90	70
27.5	20.7	66.2	57.3	3	4	125	100	200	100	90	90
30	22.5	72.2	62.6	3	4	125	100	200	100	100	90
35	26.3	84.2	73	2	3	150	125	200	200	125	100
40	30.0	96.2	83.4	1/0	2	175	150	200	200	150	125
45	33.8	106.3	93.5	1/0	1	200	150	200	200	150	150
50	37.6	120.3	104.2	2/0	1/0	200	175	200	200	175	150
60	45.1	144.3	125.1	3/0	2/0	250	200	400	200	200	175
70	52.6	168.4	145.9	4/0	3/0	300	250	400	400	250	200
75	56.3	180.4	156.4	250 MCM	4/0	300	250	400	400	250	200
80	60.1	192.5	166.8	300 MCM	4/0	350	300	400	400	300	250
90	67.5	216.5	187.6	350 MCM	250 MCM	400	300	400	400	300	250
100	75.1	240.6	206.5	400 MCM	300 MCM	400	350	400	400	350	300
125	93.8	300.7	260.6	(2) 4.0	(2) 2/0	500	450	600	500	450	350
150	112.7	360.6	312.7	(2)250MC	(2) 4/0	600	500	600	500	500	450
175	131.4	421.0	364.9	(2)300MCM	(2) 250 MCM	700	600	600	600	600	500
200	150.2	461.1	417	(2)400MCM	(2) 350 MCM	800	700	800	800	700	600
225	168.0	541.3	469.1	(2)500MCM	(2) 400 MCM	900	800	1200	800	800	600
250	167.8	501.4	521.2	(2)300MCM	(2) 00 MCM	1000	900	1200	1200	900	700
275	206.6	661.5	573.4	(2)350MCM	(2) 300 MCM	1200	1000	1200	1200	900	800
300	225.3	121.7		(2) 400MCM	(2) 300 MCM	1200	1000	1200	1200	1000	900

**▲ Ampecity based on 135 % rated capacitor current.**

**● Fuse rating based on 165 % rated capacitor current for class r time delay.**

**★ Switch rating based on 165 % rated capacitor current.**

**■ Breaker based on 135 % rated capacitor current.**

**TABLA 2**  
**480 Volt 3Ø/60 Hertz**

<b>Kvar Rating</b>	<b>Rated Current</b>	<b>Wire size ▲ 75° C Cu</b>	<b>Fuse ● Amperes</b>	<b>Fusible ★ Switch Amperes</b>	<b>Current Breaker Ampères ■</b>
2.5	3.0	14	5	30	15
5	6.0	14	10	30	15
7.5	8.0	14	18	30	15
10	12.0	12	20	30	20
12.5	15.0	10	25	30	25
15	15.0	10	30	30	25
17.5	21.0	10	35	60	30
20	24.1	8	40	60	35
22.5	27.1	8	45	60	40
25	30.1	8	50	60	45
27.5	33.1	8	60	80	45
30	38.1	8	60	80	50
35	42.1	8	70	100	50
40	48.1	6	80	100	70
45	54.1	6	90	100	80
60	60.1	4	100	100	90
60	72.2	4	125	200	100
70	84.2	3	150	200	125
75	90.2	2	150	200	125
80	96.2	1	175	200	150
90	100.3	1/0	200	200	150
100	120.3	1/0	200	200	175
125	150.4	2/0	250	400	225
150	180.4	4/0	300	400	250
175	210.5	250 MCM	350	400	300
200	240.5	300 MCM	400	400	350
225	270.6	(2) 2/0	450	800	400
250	300.7	(2) 3/0	500	800	450
275	330.8	(2) 4/0	600	800	450
300	360.8	(2) 4/0	600	900	500
325	390.8	(2) 250 MCM	700	900	500
350	421.0	(2) 300 MCM	700	900	500
375	451.1	(2) 300 MCM	800	800	700
400	481.1	(2) 350 MCM	800	800	700
425	511.2	(2) 400 MCM	800	1200	700
450	541.3	(2) 500 MCM	900	1200	800
475	571.3	(2) 500 MCM	1000	1200	800
500	601.4	(2) 300 MCM	1000	1200	900
525	631.5	(2) 300 MCM	1200	1200	900
550	661.5	(2) 350 MCM	1200	1200	900
575	691.6	(2) 400 MCM	1200	1200	1000
600	721.7	(2) 400 MCM	1200	1200	1000

▲ Ampacity based on 135 % rated capacitor current.

● Fuse rating based on 165 % rated capacitor current for class r time delay.

★ Switch rating based on 165 % rated capacitor current.

■ Breaker based on 135 % rated capacitor current.

**TABLA 3**  
**600 Volt 3Ø/60 Hertz**

<b>Kvar Rating</b>	<b>Rated Current</b>	<b>Wire size ▲ 75° C Cu</b>	<b>Fuse ● Amperes</b>	<b>Fusible ★ Switch Amperes</b>	<b>Current Breaker Ampères ■</b>
2.5	2.4	14	5	30	10
5	4.5	14	10	30	15
7.5	7.2	14	15	30	15
10	8.5	14	20	30	15
12.5	12.0	12	25	30	20
15	14.4	12	30	30	20
17.5	16.8	10	30	30	25
20	18.2	10	35	60	30
22.5	21.7	10	40	60	30
25	24.0	8	40	60	35
27.5	26.5	8	45	60	40
30	26.9	8	50	80	40
35	33.7	6	60	80	50
40	36.5	6	70	100	60
45	43.3	6	80	100	60
50	48.1	6	80	100	70
60	57.7	4	100	100	80
70	67.4	3	125	200	100
75	72.2	3	125	200	100
80	77.0	2	140	200	125
90	86.6	1	175	200	125
100	96.2	1/0	200	200	150
125	120.3	2/0	250	200	175
150	144.3	3/0	300	400	200
175	166.4	4/0	350	400	250
200	182.3	300 MCM	400	400	300
225	216.5	350 MCM	400	400	300
250	240.5	400 MCM	450	400	350
275	264.6	600 MCM	500	600	400
300	268.7	(2) 3/0	500	600	400
325	312.7	(2) 4/0	600	600	450
350	336.8	(2) 4/0	600	600	500
375	360.9	(2) 250 MCM	600	600	500
400	354.9	(2) 300 MCM	600	600	600
425	408.0	(2) 300 MCM	600	800	600
450	433.0	(2) 350 MCM	600	800	600
475	437.5	(2) 350 MCM	800	800	700
500	481.1	(2) 400 MCM	800	800	700
525	506.2	(2) 400 MCM	900	1200	700
550	522.2	(2) 500 MCM	900	1200	800
575	563.3	(2) 500 MCM	1000	1200	800
600	577.4	(2) 500 MCM	1000	1200	800

▲ Ampecity based on 135 % rated capacitor current.

● Fuse rating based on 165 % rated capacitor current for class r time delay.

★ Switch rating based on 165 % rated capacitor current.

■ Breaker based on 135 % rated capacitor current.