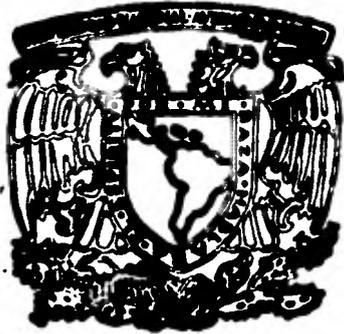


2ej. 2

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA



CORRECCION DEL BAJO FACTOR DE POTENCIA
EN LA INDUSTRIA NACIONAL

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A N

FRANCISCO JAVIER ACEVEDO VENERAS
FEDERICO CULBERTO DIAZ GARCIA
JESUS MEDINA OLIVO

MEXICO, D. F.

1981



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

C O N T E N I D O.

PAG.

I N T R O D U C C I O N.

CAPITULO.	1. FUNDAMENTOS DE CORRIENTE ALTERNA.	
	1. ANTECEDENTES.	1
	2. GENERACION DE UNA FUERZA ELECTRO <u>MOTRIZ</u> INDUCIDA ALTERNA.	2
	3. GENERADOR ELEMENTAL DE CORRIENTE ALTERNA.	3
	4. VALOR EFICAZ DE LA CORRIENTE ALTERNA.	7
	5. CIRCUITOS ELEMENTALES.	9
	6. RESONANCIA.	20
	7. POTENCIA REAL Y REACTIVA EN LOS SISTEMAS DE C.A. MONOFASICOS.	24
	8. SISTEMAS TRIFASICOS.	30
	9. FACTOR DE POTENCIA.	42
CAPITULO	II. REPERCUSSIONES DE UN BAJO FACTOR DE POTENCIA EN LOS SISTEMAS ELECTRICOS INDUSTRIALES.	
	1. DISMINUCION DE LA CAPACIDAD PARA MANEJAR POTENCIA ACTIVA.	46
	2. DEFICIENTE REGULACION DE VOLTAJE.	50
	3. PERDIDAS EN CONDUCTORES POR EFEC <u>TO</u> JOULE.	61

	<u>PAG.</u>
	63
CAPITULO	III. METODOS DE DETECCION DEL FACTOR DE POTENCIA.
	67
	70
	74
	81
CAPITULO	IV. ANALISIS TECNICO-ECONOMICO DE LOS METODOS DE CORRECCION DEL BAJO FACTOR DE POTENCIA.
	85
	90
	93
	98
	98
	105

	<u>PAG.</u>
3.2) LOCALIZACION DE LOS CAPACITORES.	114
3.3) APLICACION DE ALTERNATIVAS.	119
3.4) CONSIDERACIONES PARA LA -- INSTALACION DE CAPACITORES- EN BAJA TENSION.	135
3.5) CONSIDERACIONES PARA LA INS- TALACION DE CAPACITORES EN ALTA TENSION.	141
3.6) CONTROL AUTOMATICO DE CONE- XION Y DESCONEXION DE CAPA- CITORES.	149
3.7) CONDICIONES DE OPERACION Y MANTENIMIENTO.	157
4. METODO DE CORRECCION DEL BAJO -- F.P. EMPLEANDO MOTOR SINCRONO.	166
CONCLUSIONES:	178
APENDICE-FUNCIONES SENOIDALES, FASORES.	179
BIBLIOGRAFIA.	187

INTRODUCCION

El impulso que el Sistema de Gobierno Contemporaneo está dando a la Industria Nacional ha permitido, en gran medida que ésta esté creciendo aceleradamente. Esta Industria nacional que generalmente en sus inicios cuenta con recursos técnico-económicos limitados propicia que este crecimiento no se apoye en una planeación adecuada, provocando ésto, ineficiencias encadenadas de las cuales casi siempre adolece la pequeña y mediana industria.

Toda Industria debe procurar tener un adecuado control económico de su producción; para este fin es indispensable tener una vigilancia minuciosa sobre los costos de producción. Uno de los factores que los afecta en gran medida, es el consumo de la energía eléctrica.

La eficiencia con la que se utiliza la energía eléctrica, generalmente es visto como un aspecto secundario dentro de los objetivos a lograr, y ésta situación principalmente se da cuando se carece de suficiente información técnica que pueda ser utilizada en forma fácil y accesible por el personal técnico responsable de la operación, que en muchos casos no cuenta con la formación profesional idónea.

Con esta tesis pretendemos aportar los elementos necesarios para la completa concientización del lector, de las repercusiones que provoca el mal manejo de la energía eléctrica por operar con - - BAJO FACTOR DE POTENCIA, así como para detectarlo y corregirlo.

Cabe hacer notar, que en lo posible, se cuidó que la información que se proporciona, sea entendible por cualquier persona con conocimientos técnicos elementales.

CAPITULO I

FUNDAMENTOS DE CORRIENTE ALTERNA

1. ANTECEDENTES

Los sistemas de energía eléctrica se iniciaron a fines del siglo XX con las instalaciones de Edison. Estos sistemas en principio funcionaron a base de corriente directa y a baja tensión, la que limitaba por razones económicas la distancia a la que podría --- transmitirse la energía eléctrica de los centros de producción a los sitios de consumo.

Sin embargo fué hasta 1883 que con la invención del transformador de potencial y el uso de la corriente alterna, fué posible - la transmisión en una forma eficiente y económica de grandes cantidades de energía eléctrica y a través de largas distancias, ya que en un sistema de corriente alterna el transformador nos permite elevar las tensiones de transmisión y con ello reducir las - pérdidas en las líneas de transmisión.

Los primeros sistemas de corriente alterna fueron monofásicos, - pero más tarde con el desarrollo de los sistemas polifásicos se - llegó a la conclusión de que el sistema trifásico resultaba ser - el más conveniente y el óptimo desde el punto de vista técnico - y económico.

En la actualidad éste último sistema es el más utilizado, entre - sus principales ventajas está la de que para una potencia dada - se obtiene un ahorro considerable de conductor utilizado en las - líneas de transmisión en comparación con otros sistemas polifási - cos. Además la potencia total suministrada por un sistema trifá - sico equilibrado es constante mientras que en un sistema monofá - sico ésta misma potencia es pulsante.

Podemos considerar también que, para una misma potencia, un al - ternador ó un motor monofásico ocuparán un mayor volumen y por -

consiguiente serán más caros que su correspondiente trifásico -- (3 ϕ).

En la actualidad la producción y transmisión de energía eléctrica en su mayoría se realiza a base de corriente alterna, aunque en algunos casos su uso final no sea como tal. De hecho hay muchas circunstancias que obligan a seguir utilizando la corriente directa, ya que es absolutamente necesaria principalmente para propósitos industriales como son: El uso de motores de corriente directa, procesos electrolíticos, en las operaciones de tracción (como son las gruas) sistemas eléctricos de transporte (metro, tranvia, etc.).

Los motores de corriente directa son indispensables debido a su alto par de arranque sin embargo, existen otras muchas razones por las que la corriente alterna se utiliza más que la corriente directa, algunas de las cuales se mencionan a continuación:

- a) Facilita la creación de campos magnéticos giratorios en la operación de los motores de corriente alterna.
- b) Facilita la elevación y la reducción de tensión, lo cual nos permite obtener una amplia gama de niveles para la aplicación a la electrotecnia.
- c) En operaciones a velocidad constante el motor de inducción del tipo "JAULA DE ARDILLA" es más económico tanto en el costo de producción como en el de mantenimiento.
- d) Facilita las aplicaciones de interruptores de gran potencia.

2. GENERACION DE UNA FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA ALTERNA

La generación de una fuerza electromotriz (fem.) inducida alterna en un circuito formado por un conductor eléctrico se basa en la Ley de Faraday, que expresada en forma matemática se puede escribir como:

$$e = - \frac{d \phi_m(t)}{dt} \quad (1,1)$$

donde: e = es la fem. inducida (en volts).
 $\phi_m(t)$ = es el flujo magnético (función del tiempo) que -
 cruza el circuito (en Webers).
 t = es el tiempo medido en segundos

Es decir: "La fem. generada en el circuito es proporcional a la rapidez de variación del flujo magnético que atraviesa al mismo". El signo negativo se debe al fenómeno expresado en la Ley de --- Lenz, la cual nos dice que la fuerza electromotriz (fem.) inducida en el circuito, es de un sentido tal, que la corriente producida en él, produce a su vez un flujo magnético, que se opone a la variación del flujo magnético total que atraviesa el circuito.

3. GENERADOR ELEMENTAL DE CORRIENTE ALTERNA

Este es un dispositivo que, basado en el principio de la Ley de Faraday, produce una fem. alterna por medio de una espira de --- alambre conductor y dos polos magnéticos, cuyo flujo atraviesa a ésta. Si se hace girar la espira dentro de la acción del campo magnético con una velocidad constante, aparecerá en sus terminales una fem. alterna cuya frecuencia también sera constante.

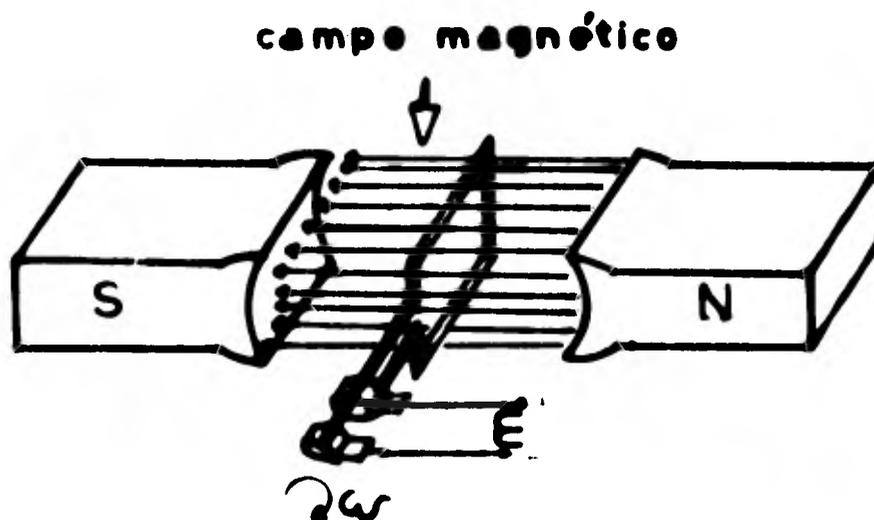


FIG. (1.1) GENERADOR ELEMENTAL (c.a.)

El par de polos magnéticos, llamado "INDUCTOR", puede estar constituido por imanes ó electroimanes. A la espira giratoria se le llama "INDUCIDO".

El flujo que atravieza la espira en cualquier instante está dado por:

$$\phi(t) = AB \cos \alpha$$

donde: α es el ángulo formado por la trayectoria del campo y la normal a la superficie de la espira.

A es el área que encierra la espira (m^2)

B es el campo magnético producido por el inductor

$$\left[\frac{\omega_b}{m^2} \right].$$

Aplicando la Ley de Faraday:

$$\frac{d \phi(t)}{dt} = AB \operatorname{sen} \alpha \frac{d\alpha}{dt};$$

como $\frac{d\alpha}{dt} = \omega$ y también $\omega = 2\pi f$.

tendremos de la expresión (1.1):

$$e = - \frac{d \phi_m(t)}{dt}$$

$$e = AB 2\pi f \operatorname{sen} \alpha$$

si el ángulo $\alpha = 2\pi f t$.

con f como la frecuencia con la que gira la espira. El valor-máximo para e . ($e_{\text{máx}}$) será cuando

$$\operatorname{sen} \alpha = 1 \quad \text{o sea} \quad e_{\text{máx}} = AB 2\pi f \quad (1.2)$$

$$\text{de aqui} \quad e = e_{\text{máx}} \operatorname{sen} 2\pi ft \quad (1.2a)$$

Se deduce entonces que la fem. producida en el generador elemental de una espira, varia en forma senoidal respecto del tiempo - con una amplitud máxima $e_{m\acute{a}x.}$ y un periodo $T = \frac{1}{f}$ o bien -----
 $T = \frac{1}{2\pi\omega}$ como lo indica la figura (1.2).

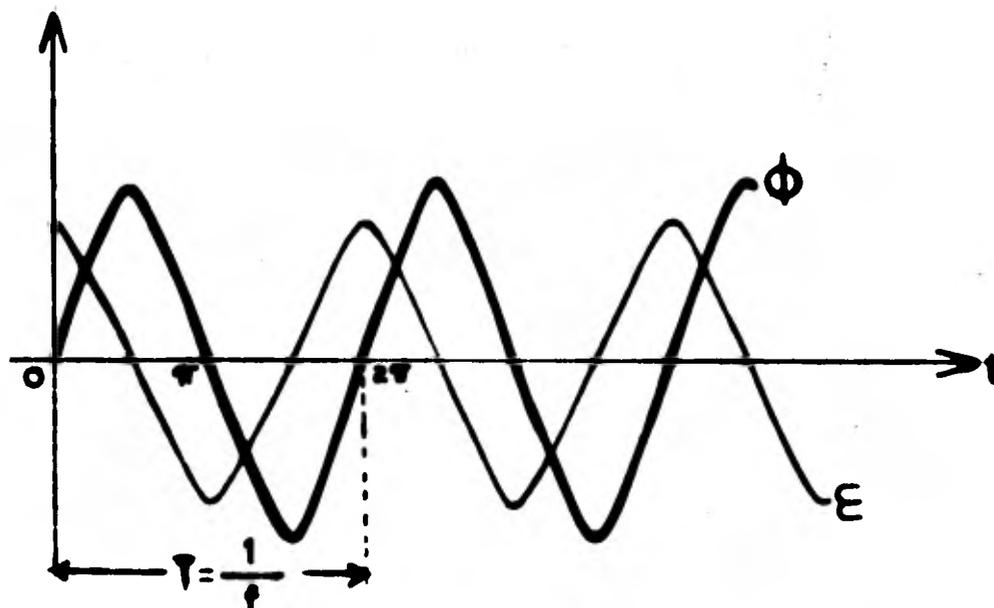


FIG. (1.2) GRAFICA DE FEM.

Para un número N de espiras la expresión (1.2) quedará de la siguiente manera:

$$e = N AB 2\pi f \text{ sen } 2\pi ft$$

substituyendo por $2\pi f = \omega$

$$\text{se tiene } e = NAB \omega \text{ sen } 2\pi ft \quad (1.2b)$$

Como se observa en el desarrollo anterior la fem. inducida es -- una función directa de la velocidad con la que gira el inducido- (espira ó espiras) que, en un generador convencional se le llama "DTØ".

Cuando se tienen mas de un par de polos magnéticos en el induc-- tor el inducido giratorio (bobina giratoria) ó ROTOR será atrave

sada en una vuelta mecánica por varias alternaciones NORTE-SUR - del campo magnético y entonces la frecuencia de la fem. inducida aumentará y estará dada por la expresión:

$$f = \frac{n\omega}{2\pi} \quad \text{con} \quad \omega = \frac{2\pi n_r}{60}$$

o sea

$$f = \frac{n \frac{2\pi n_r}{60}}{2\pi} \quad \text{de aqui} \quad f = \frac{n_r n}{60} \quad (1.3)$$

donde: ω = velocidad angular del rotor
 n = número de pares de polos magnéticos
 n_r = número de revoluciones por minuto del rotor.
 f = frecuencia eléctrica de la fem.

O sea que la frecuencia de rotación del rotor está dada por:

$$f \text{ mec. rotor} = \frac{f}{n}$$

o bien

$$f = f \text{ mec. rotor} \times n \quad (1.4)$$

siendo ésta otra forma de determinar la frecuencia de la fem. inducida.

La construcción de los alternadores comerciales que se usan en la industria funcionan bajo los mismos principios del generador elemental, sin embargo tienen algunas diferencias de construcción algunas de las cuales mencionaremos:

- a) El inductor que produce el campo magnético es el que gira y sus electroimanes se alimentan con corriente directa. Así la variación del flujo magnético tiene lugar con el movimiento del rotor. Es decir el inductor constituye el rotor que es accionado mecánicamente mientras el inducido llamado estator permanece fijo. Esto se hace debido a que durante la producción de energía eléctrica en el alternador, ésta se debe tomar del inducido y si éste estuviese girando se tendría que tomar por medio de anillos deslizantes y escobillas.

llas lo que ocasionaria problemas de chisporroteos peligrosos que perjudicarían a éstos últimos y a los devanados.

- b) Por otra parte el embobinado de campo ó inductor es menos pesado y menos voluminoso que el inducido por lo que mecánica y económicamente resulta más conveniente para mover.

4. VALOR EFICAZ DE LA CORRIENTE ALTERNA

Ya que la corriente alterna no tiene un valor fijo, una manera muy conveniente de medir la corriente esta, es usando su valor eficaz, lo cual consiste en lo siguiente:

Cuando se aplica cierta magnitud de corriente alterna a una resistencia durante un determinado tiempo se produce una cierta cantidad de calor; la cantidad de corriente directa que produce, sobre la misma resistencia y durante el mismo intervalo de tiempo, la misma cantidad de calor se llama "VALOR EFICAZ DE LA CORRIENTE ALTERNA APLICADA.

Matemáticamente éste valor se obtiene de la siguiente manera:

Considerando la energía disipada en forma de calor en un intervalo de tiempo t , como:

$$\frac{dQ}{dt} = Ri^2(t); \text{ de manera que:}$$

$$Q = \int_0^t Ri^2(t) dt$$

donde: Q = es el calor disipado en la resistencia.

En corriente alterna: $i(t) = I_m \text{ sen } \omega t$

substituyendo en la expresión para calor,

$$Q_{ac.} = \int_0^t RI_m^2 \text{ sen}^2 \omega t dt$$

esto nos da

$$Q_{ac.} = \frac{RI_m^2}{2} - \frac{RI_m^2}{2} \int_0^t \cos 2\omega t \, dt$$

como el término $\int_0^t \cos 2\omega t \, dt = 0$

$$\text{tendremos: } Q_{ac.} = \frac{RI_m^2}{2} \quad (a)$$

Para corriente directa

$$Q_{cd.} = RI_{ef}^2 \quad (b)$$

igualando Q_{ac} y Q_{cd} o sea las expresiones (a) y (b)

$$Q_{ac} = Q_{cd}$$

$$\frac{RI_m^2}{2} = RI_{ef}^2$$

$$\text{de aqui: } I_{ef}^2 = \frac{I_m^2}{2}; \text{ o sea: } I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (1.5)$$

analogamente para el voltaje se tiene la expresión:

$$V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (1.5')$$

Ya que en el estudio de potencia en corriente alterna son los valores eficaces los que usarán, es conveniente expresar los fasores¹ de voltaje y corriente con una magnitud igual al valor eficaz.

1. Ver apéndice

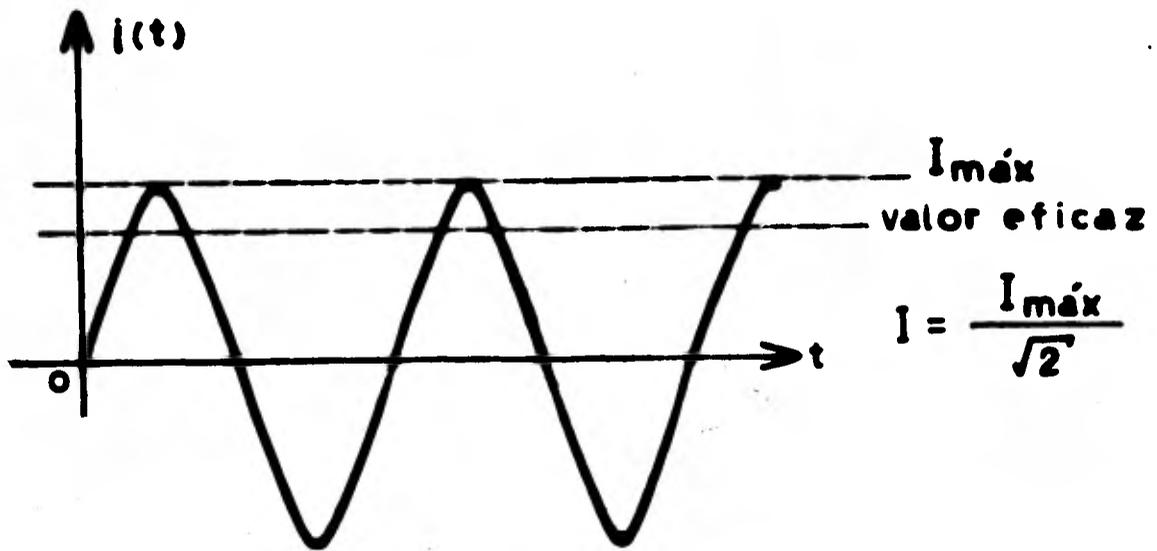


FIG. (1.3) VALOR EFICAZ DE LA C.A.

5. CIRCUITOS ELEMENTALES

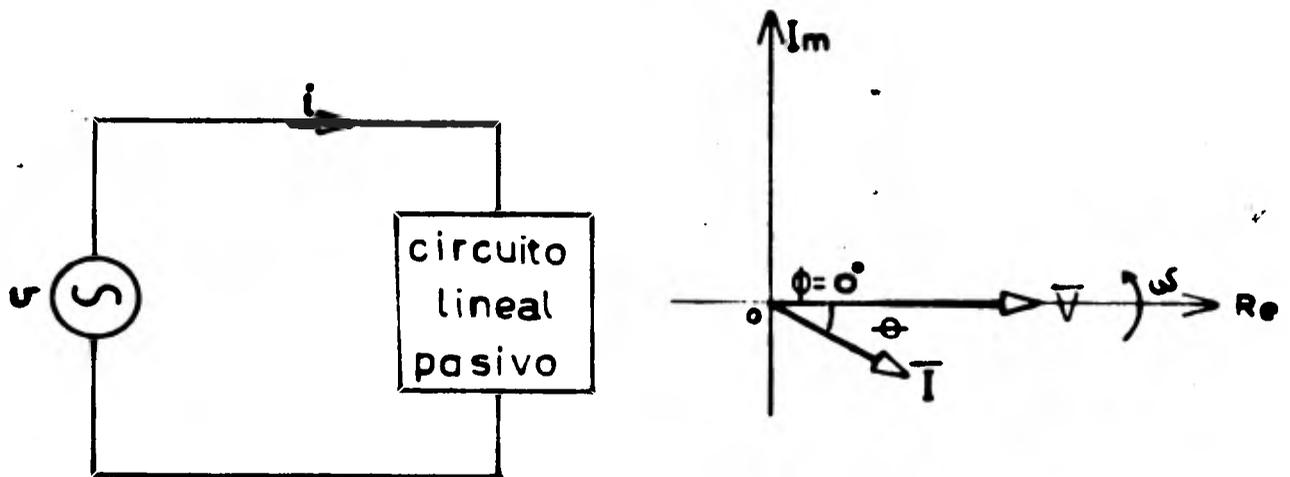
Circuito eléctrico se considera a un conjunto de dispositivos -- eléctricos interconectados eléctricamente.

Para su representación utilizamos un modelo básico simplificado -- que se puede analizar conociendo el comportamiento de cada uno -- de sus elementos. De ésta manera se conocerá el comportamiento -- de todo el circuito.

El circuito elemental queda entonces formado por una fuente de -- energía eléctrica y dispositivos pasivos receptores de la ener-- gía llamados en su conjunto carga del circuito.

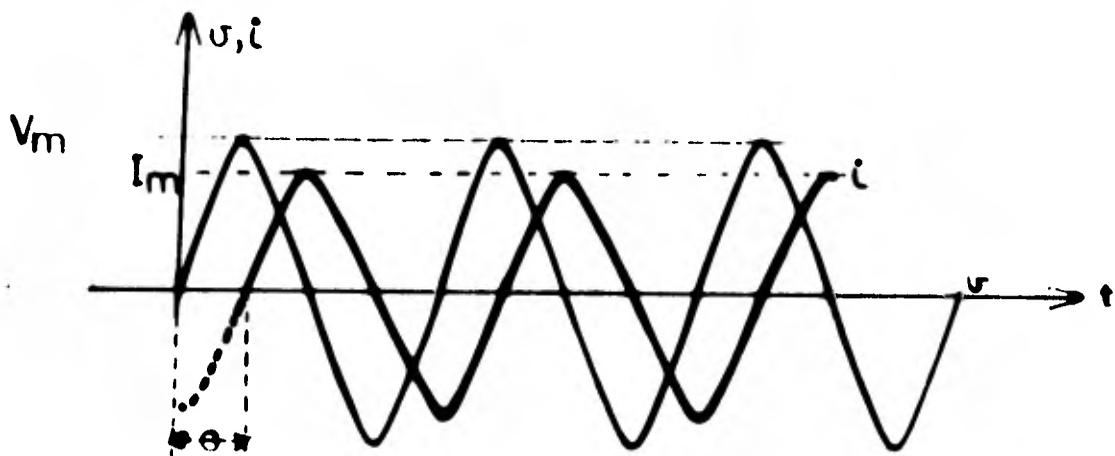
CIRCUITO DE CORRIENTE ALTERNA

Cuando una fuente de voltaje alterna se conecta a un circuito pa -- sivo y lineal se produce una corriente, también alterna que cum-



a) diagrama esquemático

b) diagrama fasorial



c) diagrama gráfico en el tiempo

FIG. (1.4) REPRESENTACION DE UN CIRCUITO EN C.A.

ple con la misma ley de variación que el voltaje aplicado. Las características de magnitud y defasamiento de esta corriente es tarán determinadas por el tipo de carga del circuito que en el análisis de c.a. es llamada impedancia del circuito.

Funcionando en régimen permanente los circuitos de corriente alterna se pueden representar como se indica en la figura (1.4). - Sus valores instantáneos expresados en función del tiempo estandarados por las expresiones analíticas:

$$v(t) = V_m \text{ sen } \omega t \quad (1.6)$$

$$\text{con } \omega = 2\pi f$$

$$i(t) = I_m \text{ sen } (\omega t + \theta) \quad (1.7)$$

Estas mismas se pueden expresar en términos de sus fasores como sigue:

$$v(t) = R_e \{ \sqrt{2} \bar{V} e^{j\omega t} \} \quad (1.6a)$$

$$i(t) = R_e \{ \sqrt{2} \bar{I} e^{j\omega t} \} \quad (1.7a)$$

siendo:

$$\bar{V} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} e^{j\phi_0} \quad (1.8)$$

$$\bar{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j(\phi_0 - \theta)} \quad (1.9)$$

los fasores del voltaje y la corriente respectivamente, donde:

V_m = es el valor máximo del voltaje aplicado

I_m = es el valor máximo de corriente en el circuito

θ = es el defasamiento que sufre la corriente con respecto al voltaje

$\omega = 2\pi f$ = es el factor de periodicidad siendo f la frecuencia de variación (ciclos/seg)

ω también representa la velocidad angular con la que gira el fa

sor \bar{V} ó \bar{I} en el plano complejo.

ϕ_0 = es el desplazamiento angular en el instante inicial o sea cuando $t = 0$.

IMPEDANCIA

En el circuito mostrado en la figura (1.4) que se encuentra en estado senoidal permanente, a la relación del fasor voltaje y el fasor corriente se le llama IMPEDANCIA DEL CIRCUITO. O sea:

$$\text{impedancia } z \dots z = \frac{\bar{V}}{\bar{I}} \quad (1.10)$$

que substituyendo las expresiones (8) y (9) en la ecuación (10) - además de considerando $\phi_0 = 0$ obtendremos:

$$z = \frac{V_m e^{j(0)}}{I_m e^{j(0-\theta)}}; \text{ de manera que: } z = \frac{V_m \angle 0^\circ}{I_m \angle -\theta}$$

$$\text{finalizando con } z = \frac{V_m}{I_m} \angle \theta \quad (1.11)$$

A la ecuación (1.11) se le considera como la LEY DE OHM en circuitos de c.a. Al igual que la resistencia en circuitos de corriente directa (c.d) se mide en ohms.

Existen 3 tipos de impedancia:

- i) Impedancia resistiva
- ii) Impedancia inductiva
- iii) Impedancia capacitiva

En seguida se analiza el comportamiento del circuito de c.a. para cuando la carga es cada uno de los casos particulares de las impedancias mencionadas.

- i) CIRCUITO RESISTIVO

En el circuito mostrado en la figura 1.5 se representa un circui

to ideal con una carga puramente resistiva; se cumple de acuerdo con la Ley de Ohm que:

$$v(t) = Ri(t) \quad (1.12)$$

siendo R la resistencia del circuito.

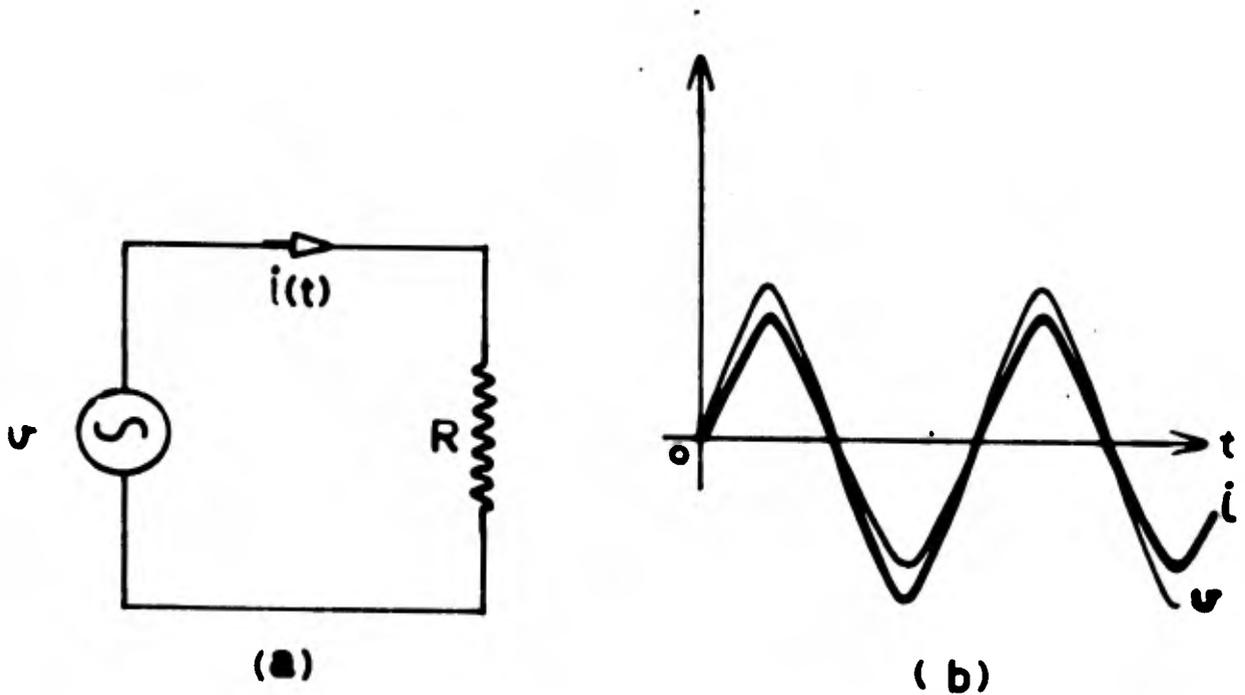
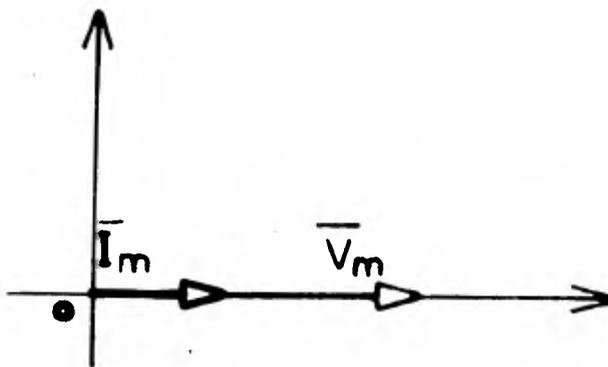


FIG. (1.5) CIRCUITO RESISTIVO IDEAL



c) representación fasorial

FIG. (1.5) CIRCUITO RESISTIVO IDEAL

Si la fuerza electromotriz aplicada al circuito es un voltaje al terno senoidal: $v(t) = V_m \text{ sen } \omega t$ aplicando la ecuación 1.12 -- tendremos:

$$v(t) = Ri(t)$$

o sea $V_m \text{ sen } \omega t = Ri(t)$

o bien $i(t) = \frac{V_m}{R} \text{ sen } \omega t$ (1.13)

Esto quiere decir que la corriente que circula por el circuito resistivo es también una función senoidal del tiempo con la misma frecuencia y está en fase con la onda de voltaje (los valores máximos y mínimos coinciden en el mismo instante de tiempo para el voltaje y la corriente). De aquí puede escribirse que:

$$i(t) = I_m \text{ sen } \omega t$$
 (1.14)

$$I_m = \frac{V_m}{R}$$

$$R = \frac{V_m}{I_m} = \frac{\sqrt{2} \bar{V}}{\sqrt{2} \bar{I}}$$

En el caso de un circuito resistivo la corriente esta en fase -- con el voltaje aplicado asi que $\theta = 0$ por lo que:

$$\begin{aligned} z &= \frac{\bar{V}}{\bar{I}} \\ &= \frac{V \angle 0^\circ}{I \angle 0^\circ} \\ &= \frac{V}{I}; \quad \therefore z = R \end{aligned} \quad (1.15)$$

que se llama IMPEDANCIA DE UNA RESISTENCIA OHMICA donde V e I son los valores eficaces del voltaje y de la corriente. La impedancia en este caso de un circuito puramente resistivo es por lo tanto expresada por la ecuación 1.15 indicando para este caso -- que la corriente está en fase con el voltaje. ($z = R \angle 0^\circ$).

ii) CIRCUITO INDUCTIVO:

Todo circuito electrico por el que circulen corrientes alternas -- presentara el fenómeno de inductancia.

Un circuito tiene una inductancia de un Henry cuando la corriente que circula por él varía en la relación de un ampere por segundo e induce una f.e.m. de un volt a través de él.

El circuito **mostrado** en la figura (1.6) representa una bobina -- con una **inductancia** de valor L conectada a una fuente de tensión **alterna**.

La corriente $i(t)$ que circula por la inductancia produce un -- campo **magnético**. Si la corriente es una función del tiempo el -- campo **magnético será** también una función del tiempo.

Este campo **magnético** variable induce en el circuito una fem. -- (e) que se **opone** a la fuerza electromotriz de la fuente que --- excita el circuito.

De la Ley de Faraday:

$$e = - L \frac{d i (t)}{dt} \quad (1.16)$$

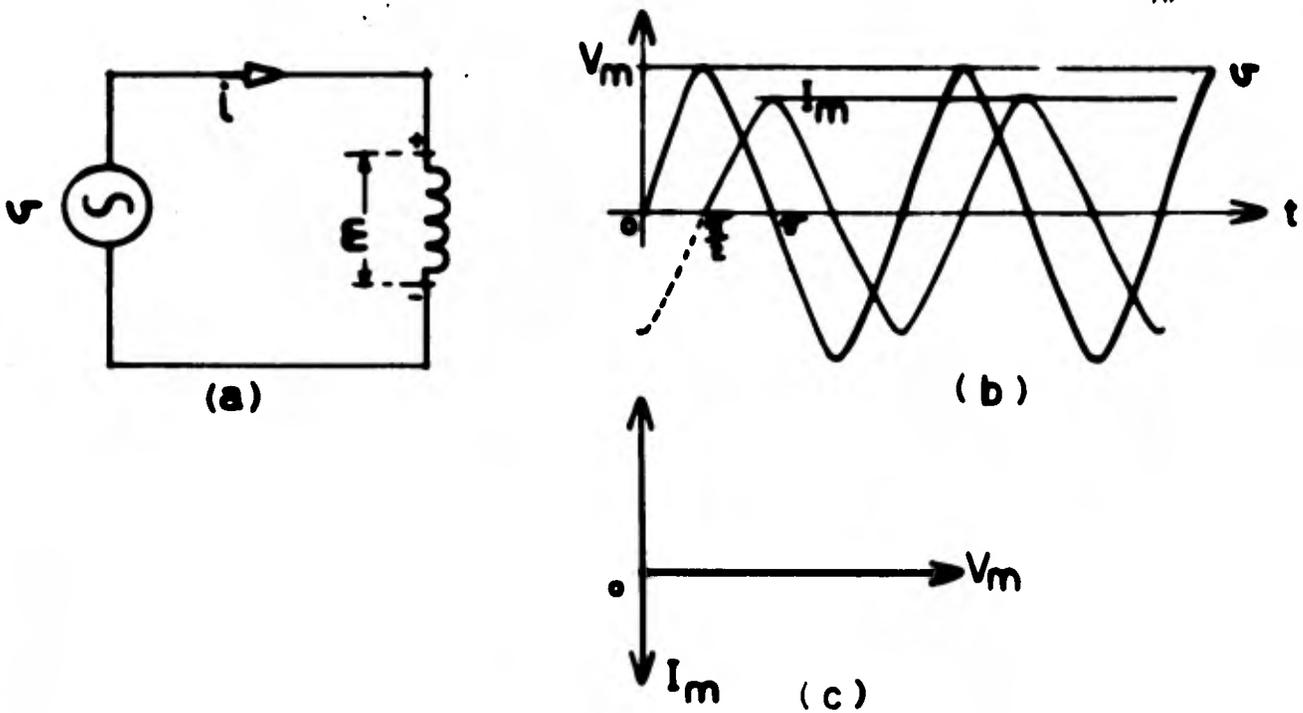


FIG. (1.6) CIRCUITO INDUCTIVO

donde: $L =$ es una constante de proporcionalidad llamada coeficiente de autoinducción ó inductancia.

Si la fuerza electromotriz que excita el circuito es una función senoidal del tiempo:

$$v(t) = V_m \text{ sen } \omega t \quad (1.17)$$

La suma de voltajes del circuito de la figura (1.6) debe ser nullo $v + e = 0$.

Substituyendo en ésta expresión las expresiones (1.16) y (1.17).

$$V_m \text{ sen } \omega t + \left(-L \frac{d i(t)}{dt} \right) = 0$$

de modo que $L \frac{d i(t)}{dt} = V_m \text{ sen } \omega t$

o bien
$$\frac{d i(t)}{dt} = \frac{V_m}{L} \text{ sen } \omega t$$

integrando ambos miembros respecto al tiempo

$$\int d i(t) = \int \frac{V_m}{L} \text{ sen } \omega t dt$$

$$i(t) = \frac{-V_m}{\omega L} \cos \omega t + k \quad (1.18)$$

considerando $k = 0$ o sea se considera unicamente el régimen permanente del circuito o nó tomando la componente transitoria de la corriente que se produce al conectar el circuito y que en un circuito real que contiene además de la inductancia cierta resistencia se amortigua rápidamente, y tomando en cuenta que

$$-\cos \omega t = \text{sen} \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

entonces substituyendo en la ecuación (1.18)

$$i(t) = \frac{V_m}{\omega L} \left(\text{sen } \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (1.19)$$

Esta demuestra que la corriente que circula por el circuito puramente inductivo es una corriente alterna senoidal atrasada 90° -- $\left(-\frac{\pi}{2} \right)$ con respecto al voltaje aplicado y de la misma frecuencia figura (1.6).

La expresión (1.19) se puede escribir en forma fasorial como;

$$\bar{i} = \frac{V_m}{\sqrt{2} \omega L} e^{-j\frac{\pi}{2}}$$

o sea

$$\bar{i} = \frac{V_m}{\omega L \sqrt{2}} \angle -\frac{\pi}{2}$$

siendo el fasor de la fuente de tensión $\bar{V} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \angle 0$ entonces con las expresiones para \bar{i} y \bar{V} podemos obtener:

$$z_L = \frac{\bar{V}}{I}$$

$$z_L = \frac{\frac{V_m}{\sqrt{2}} \cdot L_0}{\frac{V_m}{\omega L \sqrt{2}}} \quad \text{de aqui} \quad z_L = \omega L \left| \frac{\pi}{2} \right.$$

haciendo $\omega L = X_L$ reactancia inductiva tendremos la expresión

$$z_L = X_L \left| \frac{\pi}{2} \right. \quad (1.20)$$

Una bobina produce un efecto de reacción sobre la corriente alterna. Si se introduce un núcleo de hierro en una bobina se aumenta el efecto de la reacción. Esta oposición puede medirse en ohms y clasificarse como resistencia pero se denomina REACTANCIA.

iii) CIRCUITO CAPACITIVO

Un condensador ó capacitor consiste en dos placas de material conductor de electrones de material antimagnético separadas por una substancia aislante llamada dieléctrico.

Si se aplica entre las placas del condensador una diferencia de potencial (v) el condensador adquirirá una carga eléctrica que es proporcional a la diferencia de potencial aplicada y a una constante de proporcionalidad llamada CAPACITANCIA.

La capacitancia se puede definir como la cantidad de carga eléctrica que puede almacenar un condensador y depende de las dimensiones del condensador así como de la naturaleza del dieléctrico. De este modo tenemos:

$$q(t) = cv \quad (1.21)$$

Si la diferencia de potencial aplicada es un voltaje alterno senoidal tendremos:

$$q(t) = c V_m \text{ sen } \omega t \quad (1.21a)$$

diferenciando esta expresión:

$$\frac{dq(t)}{dt} = \omega c V_m \text{ cos } \omega t \quad (1.21b)$$

como la derivada de la carga con respecto al tiempo es la intensidad de corriente $\frac{dq(t)}{dt} = i(t)$ entonces $i(t) = c V_m \text{ cos } \omega t$.

Además podemos escribir $\text{cos } \omega t = \text{sen } \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$ así tenemos

$$i(t) = \frac{V_m}{\frac{1}{\omega c}} \text{ sen } \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (1.22)$$

Esto nos dice que la corriente $i(t)$ es una función senoidal -- del tiempo y está adelantada $90^\circ \left(+ \frac{\pi}{2} \right)$ con respecto al voltaje aplicado.

En la figura (1.7) se representa un circuito ideal constituido por una fuente de voltaje que alimenta a un condensador.

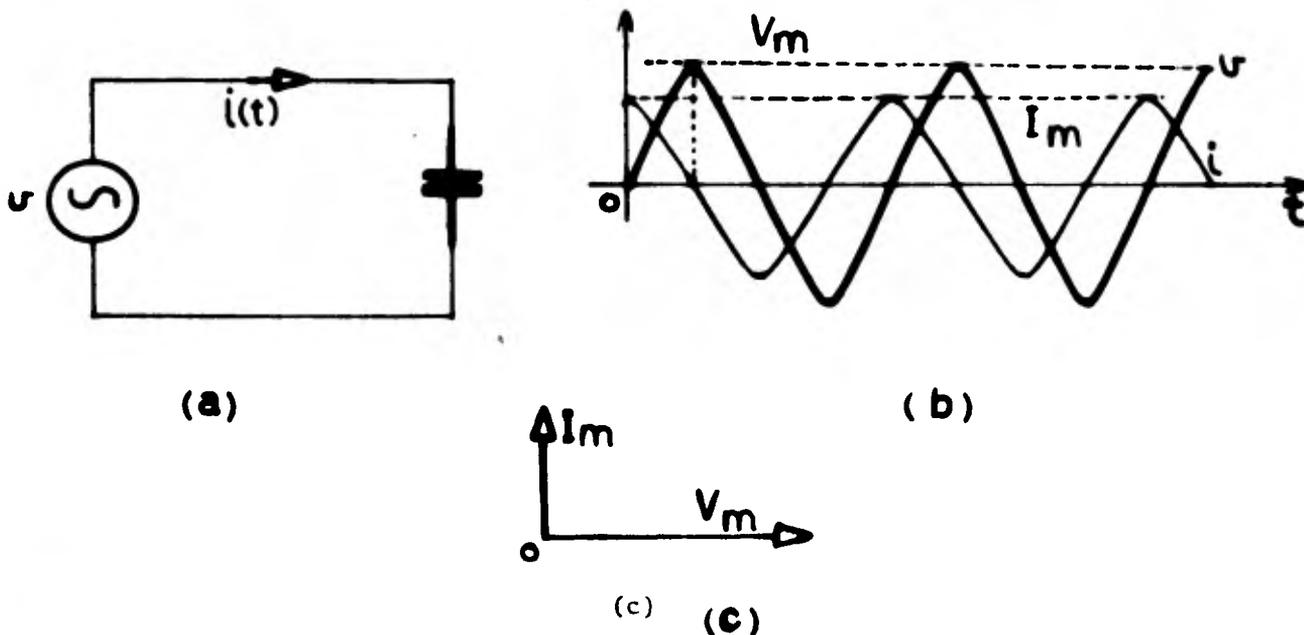


FIG. (1.7) REPRESENTACION DE UN CIRCUITO CAPACITIVO IDEAL

Así mismo la ecuación (1.22) se puede expresar en forma fasorial como:

$$\bar{I} = \omega c \frac{V_m}{\sqrt{2}} e^{j \pi/2} \quad (1.23)$$

teniendo en cuenta el fasor voltaje $\bar{V} = \frac{\bar{V}_m}{\sqrt{2}}$ se puede aplicar el concepto de impedancia $\bar{z} = \frac{\bar{V}}{\bar{I}}$ o sea $z_c = \frac{1}{\omega c} \angle -\pi/2$; haciendo -- $\frac{1}{\omega c} = X_c$ REACTANCIA CAPACITIVA tendremos:

$$z_c = X_c \angle -90^\circ \quad (1.24)$$

Reactancia capacitiva es la resistencia al flujo de la corriente alterna debido a la presencia de una capacitancia en el circuito se mide en ohms y depende de la frecuencia.

6. RESONANCIA

La resonancia es un fenómeno físico que se presenta en los Sistemas electromecánicos oscilatorios. Se caracteriza porque la amplitud de las oscilaciones de las variables eléctricas o mecánicas en los sistemas con resonancia, tienden a valores infinitos. En los sistemas electromecánicos de potencia este fenómeno es indeseable debido a sus efectos destructivos.

Basicamente en los circuitos eléctricos se dan los siguientes casos:

CIRCUITOS EN SERIE

La resonancia aparece en los circuitos serie con elementos inductivos y capacitivos cuando los parámetros L , c y f tienen valores tales que:

$$2\pi fL = \frac{L}{2\pi fc} \quad (1.25)$$

o sea específicamente cuando $X_L = X_c$.

De esta forma la impedancia del circuito es simplemente igual a su resistencia y la intensidad esta en fase con la diferencia de potencial entre los bornes del circuito.

La corriente que atraviesa un circuito resonante en serie, si su resistencia es pequeña, será grande y la diferencia de potencial entre los bornes de la inductancia y de la capacitancia puede -- ser mucho mayor que la de la fuente de tensión que alimenta el circuito.

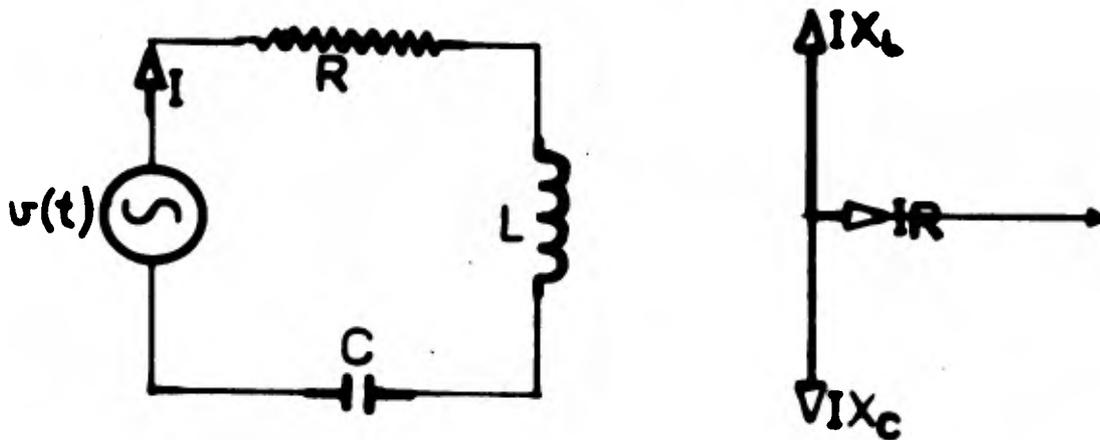


FIG. (1.8) CIRCUITO RESONANTE EN SERIE

En la figura (1.8) se muestra el diagrama vectorial para un circuito resonante en serie. Se verá que las diferencias de potencial instantáneas entre los extremos de la inductancia y de la capacitancia están defasadas 180° y aunque los valores eficaces de cada una pueden ser grandes, su resultante en todo instante es nula.

CIRCUITOS EN PARALELO

La resonancia aparece en los circuitos en serie cuando el voltaje que hay en la inductancia es igual pero opuesto al que hay en la capacitancia.

La corriente del circuito está entonces en fase con el voltaje de la línea y para un valor determinado de la resistencia la corriente en el circuito se encuentra a un valor máximo.

Sin embargo en un circuito en paralelo cuando la corriente que pasa por la inductancia iguala a la corriente que pasa por la capacitancia se neutraliza la una con la otra ya que la corriente que circula por la inductancia está exactamente 180° fuera de fase respecto a la que circula por la capacitancia. Así la corriente resultante de línea es la que pasa por la resistencia solamente. Cuando se alcanza este punto se notará, por medio del siguiente análisis vectorial, que la corriente se encuentra a un valor mínimo. Por esto se dice que el circuito es anti-resonante en contraste a la resonancia y la corriente máxima en un circuito serie.

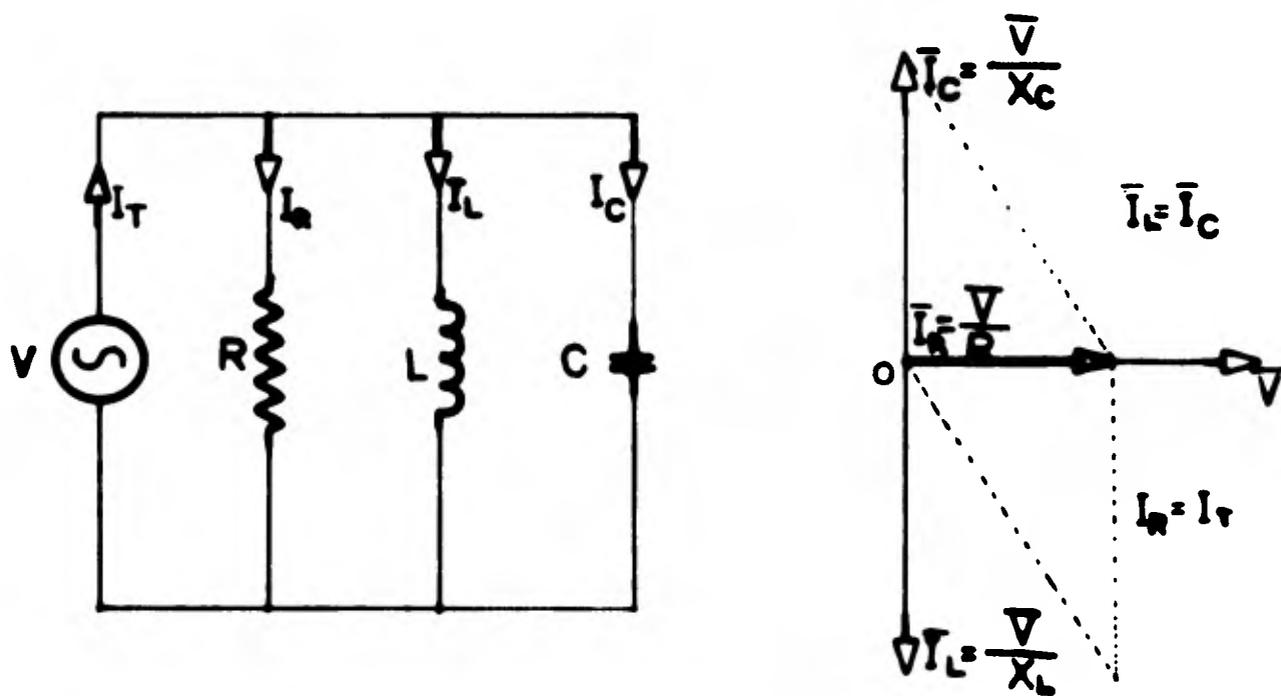


FIG. (1.9) CIRCUITO RESONANTE EN PARALELO

7. POTENCIA REAL Y REACTIVA EN LOS SISTEMAS DE CORRIENTE ALTERNA MONOFASICOS.

Consideremos un circuito de c.a. monofásicos en el cual el voltaje y la corriente estén dados por las siguientes expresiones:

$$v = V_m \text{ sen } \omega t$$

$$i = I_m \text{ sen } (\omega t + \theta)$$

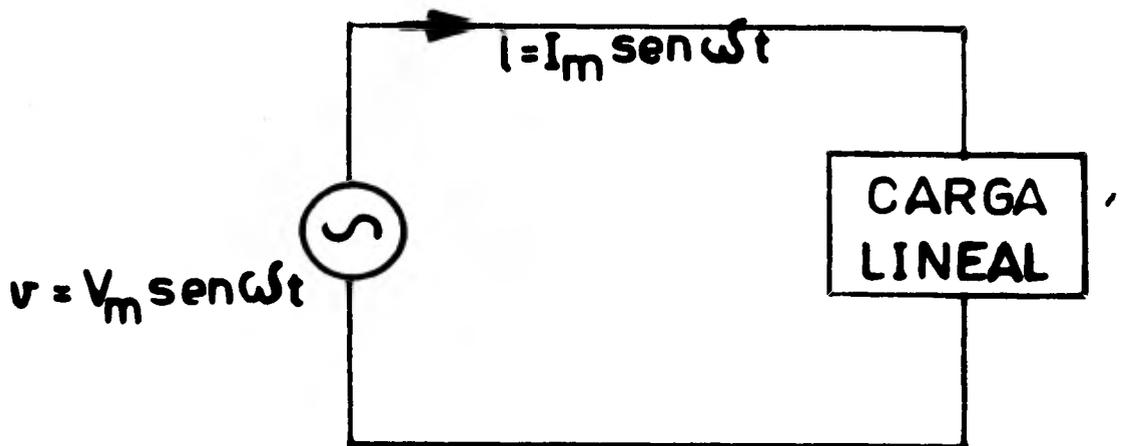


FIG. 1.10

La potencia en el circuito está dada usando valores instantáneos como: $s = vi$ o sea potencia instantánea.

$$s = vi, \text{ ó bien } s = \left[V_m \text{ sen } \omega t \right] \left[I_m \text{ sen } \omega t + \theta \right] \quad (1.25)$$

podemos desarrollar la expresión $\text{sen } (\omega t + \theta)$

$$\text{sen } (\omega t + \theta) = (\text{sen } \omega t \cos \theta + \cos \omega t \text{ sen } \theta)$$

substituyendo en la ecuación de $S = vi$ obtenemos:

$$s = \left[V_m \text{ sen } \omega t \right] I_m \left[\text{sen } \omega t \cos \theta + \cos \omega t \text{ sen } \theta \right]$$

$$= V_m I_m \text{ sen } \omega t \left[\text{sen } \omega t \cos \theta + \cos \omega t \text{ sen } \theta \right]$$

$$= V_m I_m \left(\text{sen}^2 \omega t \cos \theta + \text{sen } \omega t \cos \omega t \text{ sen } \theta \right)$$

utilizando identidades de la trigonometria

$$\text{sen } \omega t \cos \omega t = \frac{1}{2} \text{sen } 2 \omega t$$

y

$$\text{sen}^2 \omega t = \frac{1 - \cos 2 \omega t}{2}$$

tendremos $s = \frac{V_m I_m}{2} \cos \theta (1 - \cos 2 \omega t) + \frac{V_m I_m}{2} \text{sen } \theta \text{ sen } 2 \omega t$

(1.26)

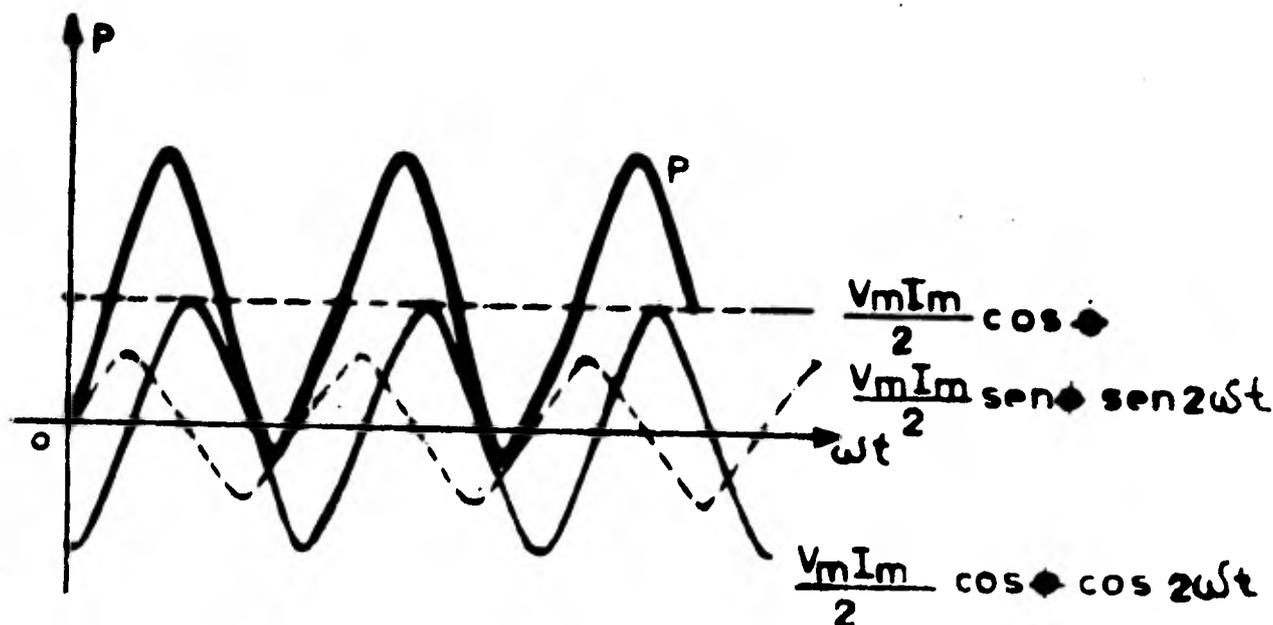


FIG. (1.11) POTENCIA INSTANTANEA Y SUS COMPONENTES

Por lo que respecta al primer término de la expresión (1.26)

$$s = \frac{V_m I_m}{2} \cos \theta (1 - \cos 2\omega t)$$

ésta representa una potencia instantánea que varía desde un valor mínimo igual a cero hasta un valor máximo igual a $V_m I_m \cos \theta$. Su valor medio durante un número entero de periodos es igual a $\frac{V_m I_m}{2} \cos \theta$. Este promedio es llamado POTENCIA REAL ó ACTIVA, se representará con la letra P y esta potencia es la energía que se consume en el sistema.

Teniendo en cuenta que $v = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$ e $i = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ que son los valores eficaces de voltaje y corriente respectivamente, al substituir en la expresión $\frac{V_m I_m}{2} \cos \theta$ obtenemos:

$$\frac{V_m I_m}{2} \cos \theta = \frac{\sqrt{2} V \sqrt{2} I \cos \theta}{2}$$

o sea
$$\frac{\sqrt{2} V \sqrt{2} I \cos \theta}{2} = VI \cos \theta \quad (1.27)$$

y en ésta expresión al término $\cos \theta$ se le llama FACTOR DE POTENCIA.

Entonces la potencia real se puede expresar por medio de la expresión (1.27)

$$P = VI \cos \theta$$

El segundo término de la expresión (1.26)

o sea:
$$\frac{V_m I_m}{2} \sin \theta \sin 2\omega t$$

representa una potencia instantánea que varia desde un valor mínimo igual a $-\frac{V_m I_m}{2} \sin \theta$. El valor medio durante un número entero de períodos es igual a cero.

El valor máximo $\frac{V_m I_m}{2} \sin \theta$ recibe el nombre de POTENCIA REACTIVA, se representa con la letra Q y puede expresarse en términos de los valores eficaces para voltaje y corriente de la siguiente forma:

$$Q = VI \sin \theta \quad (1.28)$$

Si el voltaje y la corriente están en volts y amperes respectivamente la potencia reactiva queda expresada en VOLTS AMPERES REACTIVOS (VAR'S).

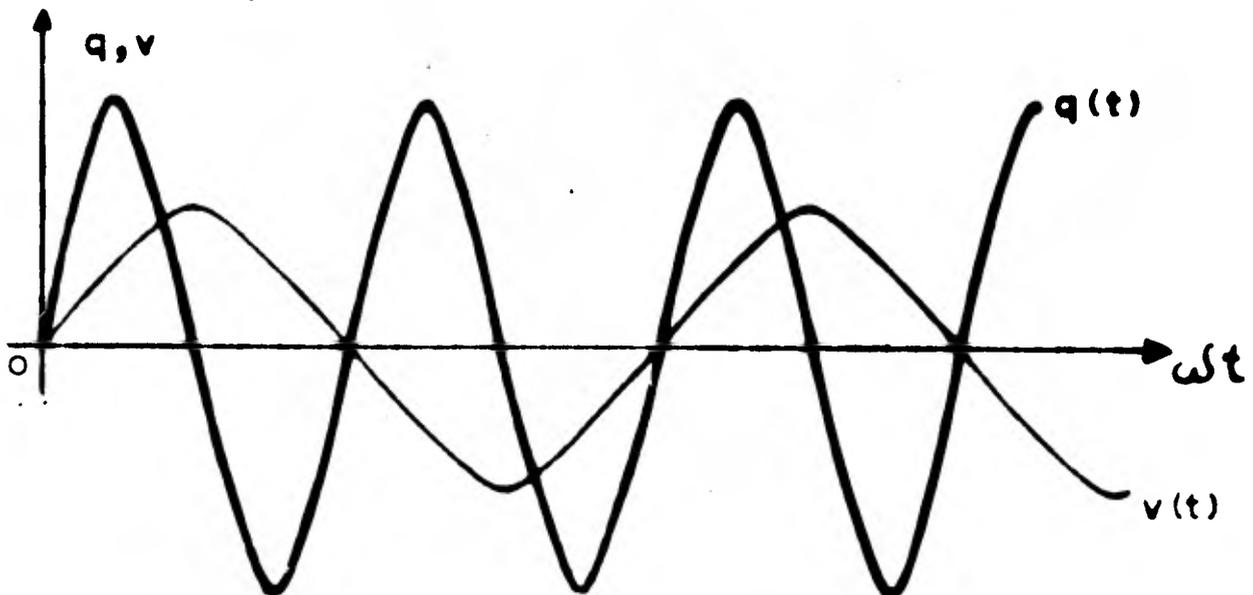


FIG. (1.12) GRAFICA DE LA POTENCIA REACTIVA

Se ve en la figura (1.12) la frecuencia es 2ω o sea el doble de la frecuencia del voltaje de la fuente. Esta energía no es aprovechable por la carga ya que ésta se encuentra oscilando entre la fuente y la carga. Esta oscilación se puede explicar de la siguiente forma:

En el primer medio ciclo la energía se almacena en el campo eléctrico, en el caso de un capacitor, y en el campo magnético en el caso de una inductancia. En el segundo medio ciclo ésta energía almacenada es devuelta hacia la fuente. Mas generalmente un sistema de éste tipo, es, decir, que solo contiene potencia reactiva, se le denomina "SISTEMA CONSERVATIVO".

POTENCIA APARENTE.

Si representamos las potencias antes mencionadas en el plano complejo la potencia P solo tiene parte real y analogamente la potencia Q solo tiene parte imaginaria.

Haciendo un análisis con valores absolutos se tiene lo siguiente:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (1.29)$$

$$S^2 = V^2 I^2 (\text{sen}^2 \theta + \text{cos}^2 \theta)$$

como $\text{sen}^2 \theta + \text{cos}^2 \theta = 1.$

entonces tendremos: $S^2 = V^2 I^2$

simplificando . . $S = \sqrt{V^2 I^2}$

y finalmente $S = VI \quad (1.30)$

a esta expresión (1.30) se le llama POTENCIA APARENTE y se mide en Volts-Amperes (VA).

La potencia aparente nos da una medida de la máxima capacidad para producir, manejar ó disipar potencia activa que tiene algún determinado dispositivo electromecánico a un factor de potencia variable.

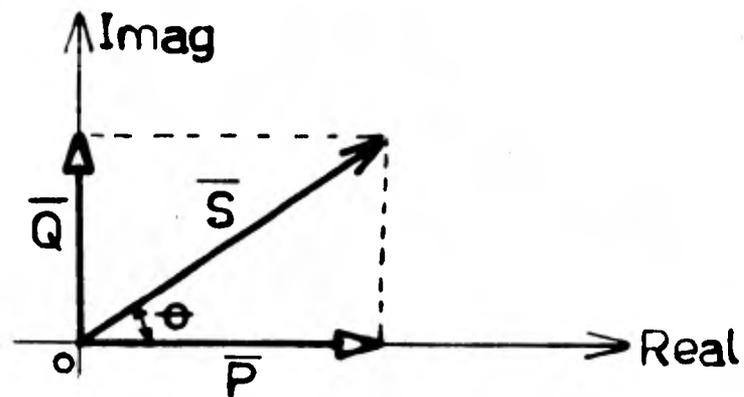


FIG. (1.13) DIAGRAMA FASORIAL DE LA POTENCIA APARENTE.

8. SISTEMAS TRIFASICOS

Un sistema trifásico consiste de tres sistemas monofásicos cuyos voltajes se encuentran defasados en el tiempo 120° . A continuación se muestra una figura (1.14) para esquematizar como se logra la generación de este tipo de voltajes trifásicos.

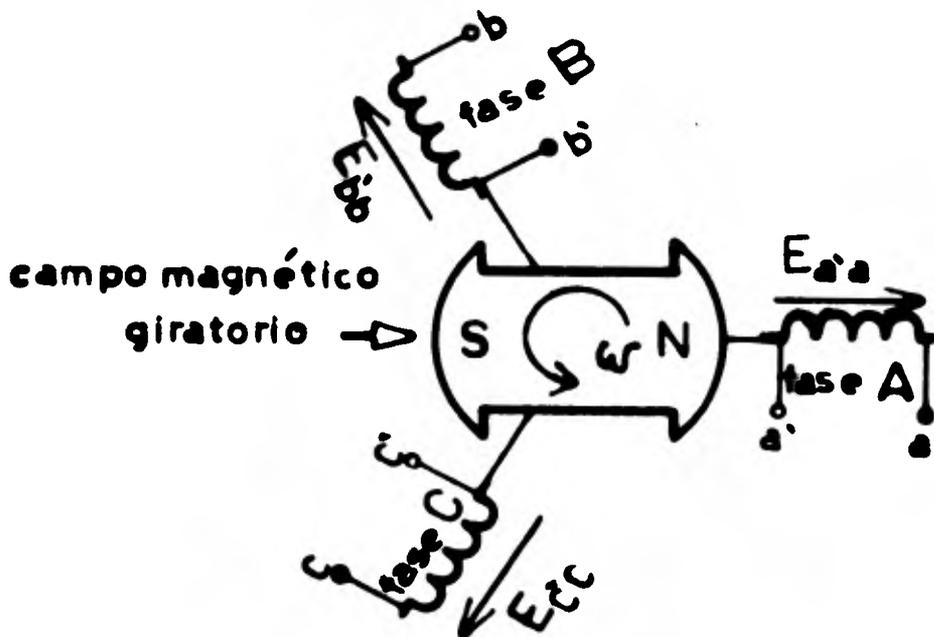
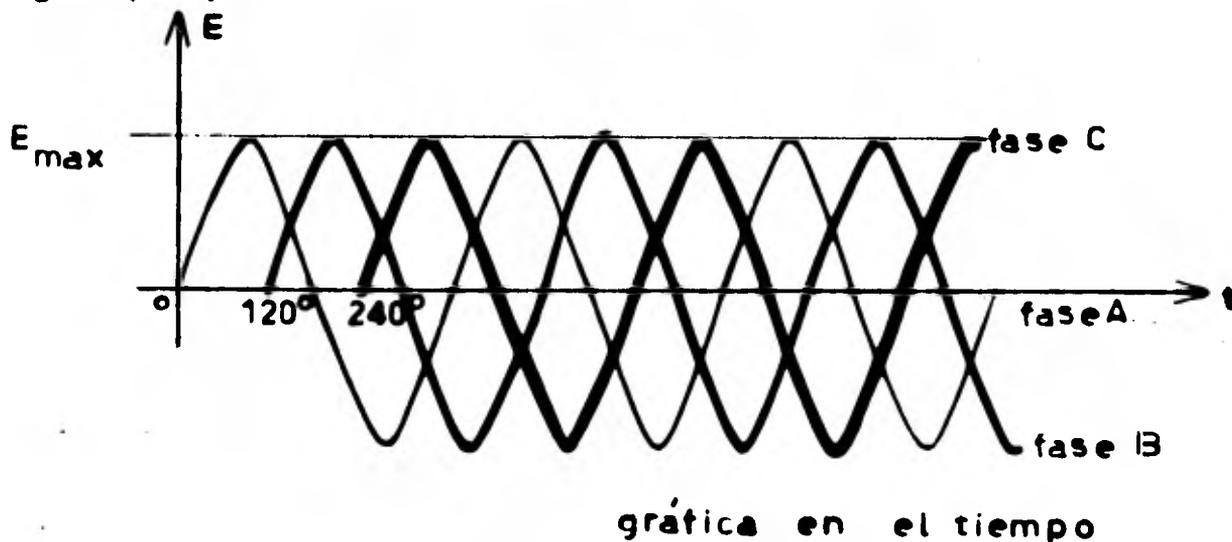


FIG. (1.14)

Mediante la distribución geométrica de los devanados del inducido a 120° entre fases, al girar el inductor (campo magnético giratorio) induce una f.e.m. senoidal en cada fase que, debido a la separación geométrica de los devanados, aparecerán con un desfase (en el tiempo) de 120° entre sí como se muestra en la figura (1.15).



$$E_{a'a} = E_m \operatorname{sen} \omega t$$

$$E_{b'b} = E_m \operatorname{sen} (\omega t - 120^\circ)$$

$$E_{c'c} = E_m \operatorname{sen} (\omega t - 240^\circ)$$

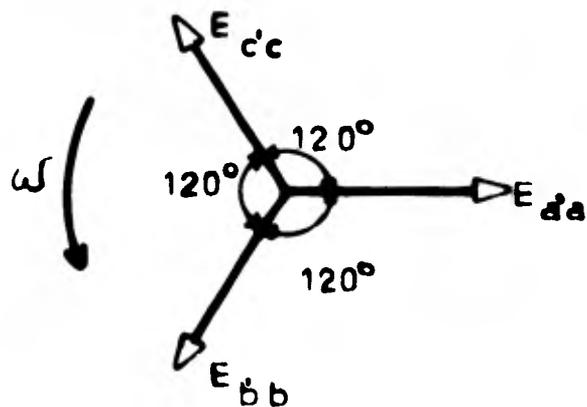


FIG. (1.15) DIAGRAMA FASORIAL

Si la secuencia con la que los fasores de tensión de las distintas fases pasando por 0° , 2π , 4π , ... $2n\pi$, al girar éstos con una velocidad angular ω en el sentido anti-horario es; E'_{aa} , E'_{bb} , E'_{cc} , E'_{aa} , ... (como en el mostrado en la figura 1.15) se dice que el sistema trifásico (3ϕ) tiene secuencia positiva.

Si la secuencia de fases es E'_{cc} , E'_{bb} , E'_{aa} , E'_{cc} , ... se tiene -- una secuencia de fases negativa. En lo subsecuente consideraremos que los sistemas trifásicos tienen secuencia positiva.

En un sistema trifásico se puede conectar cada fase a su carga -- monofásica independientemente de las otras fases. Una práctica -- muy común para conectar los devanados del generador trifásico -- (y sus cargas) es usando las conexiones: estrella de tres hilos, estrella de tres hilos con neutro externo y la conexión en delta.

CONEXION ESTRELLA

Esta consiste en conectar un extremo de cada uno de los tres devanados del generador 3ϕ a un punto común (llamado neutro). Esta conexión se muestra en la siguiente figura (1.16).

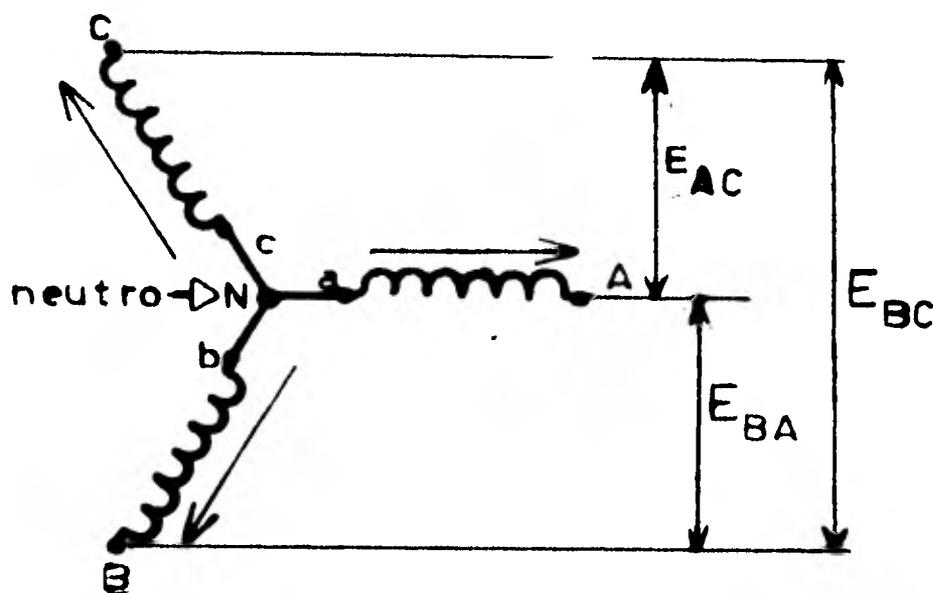


FIG. (1.16) ESQUEMA DE CONEXION ESTRELLA

El voltaje de un extremo de la estrella al neutro se llama voltaje de fase E_n (voltaje al neutro). Asimismo el voltaje entre dos extremos de la estrella se llama voltaje de línea E_L (voltaje entre fases).

De la conexión estrella podemos obtener el diagrama fasorial mostrado en la figura (1.17).

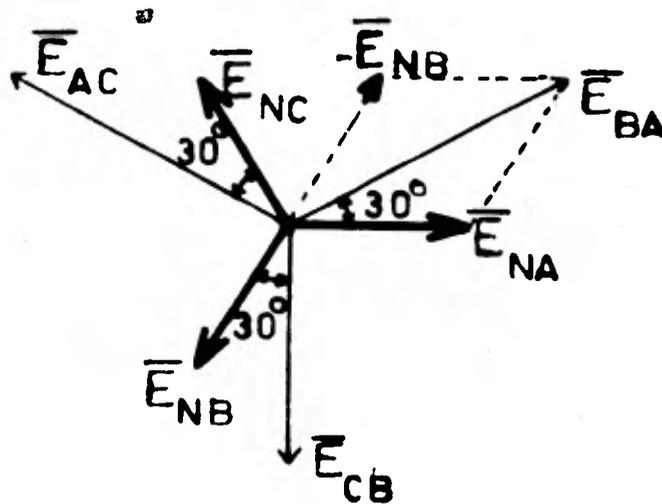


FIG. (1.17) DIAGRAMA FASORIAL DE UNA CONEXION ESTRELLA.

Los voltajes de línea E_{BA} , E_{CB} , E_{AC} se encuentran adelantados 30° de sus respectivos voltajes al neutro E_{AN} , E_{BN} , E_{CN} .

Del diagrama fasorial mostrado en la figura (1.17) se obtienen las siguientes relaciones entre los voltajes de fase y los voltajes de línea:

$$E_{BA} = E_{NA} + (-E_{NB})$$

o sea

$$E_{BA} = E_{NA} - E_{NB}$$

Si $|\vec{E}_{BA}| = E_L$ voltaje de línea

$|\vec{E}_{NA}| = |-\vec{E}_{NB}|$ voltaje de fase E_N

de aquí $E_L = 2 E_N \cos 30^\circ$

si $\cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$

entonces $E_L = \sqrt{3} E_N$ (1.31)

o sea el voltaje de línea E_L es $\sqrt{3}$ veces el voltaje de fase E_N .

Si se conecta un conductor en el neutro el sistema se llamará en tonces conexión estrella de tres hilos y neutro exterior. En és te caso se puede alimentar tres cargas monofásicas independien-- tes o bién cargas trifásicas. Si el neutro no se usa exterior-- mente el sistema se llama trifásico de tres hilos, éste se carac-- teriza por su aplicación principalmente a cargas trifásicas.

Un sistema 3ϕ opera bajo condiciones de carga balanceada cuando las corrientes en cada línea son de igual magnitud y están defa-- sadas 120° entre si.

Esto implica que en un sistema 3ϕ balanceado el ángulo entre el-- fador voltaje de fase y corriente de fase sea el mismo en las -- tres fases.

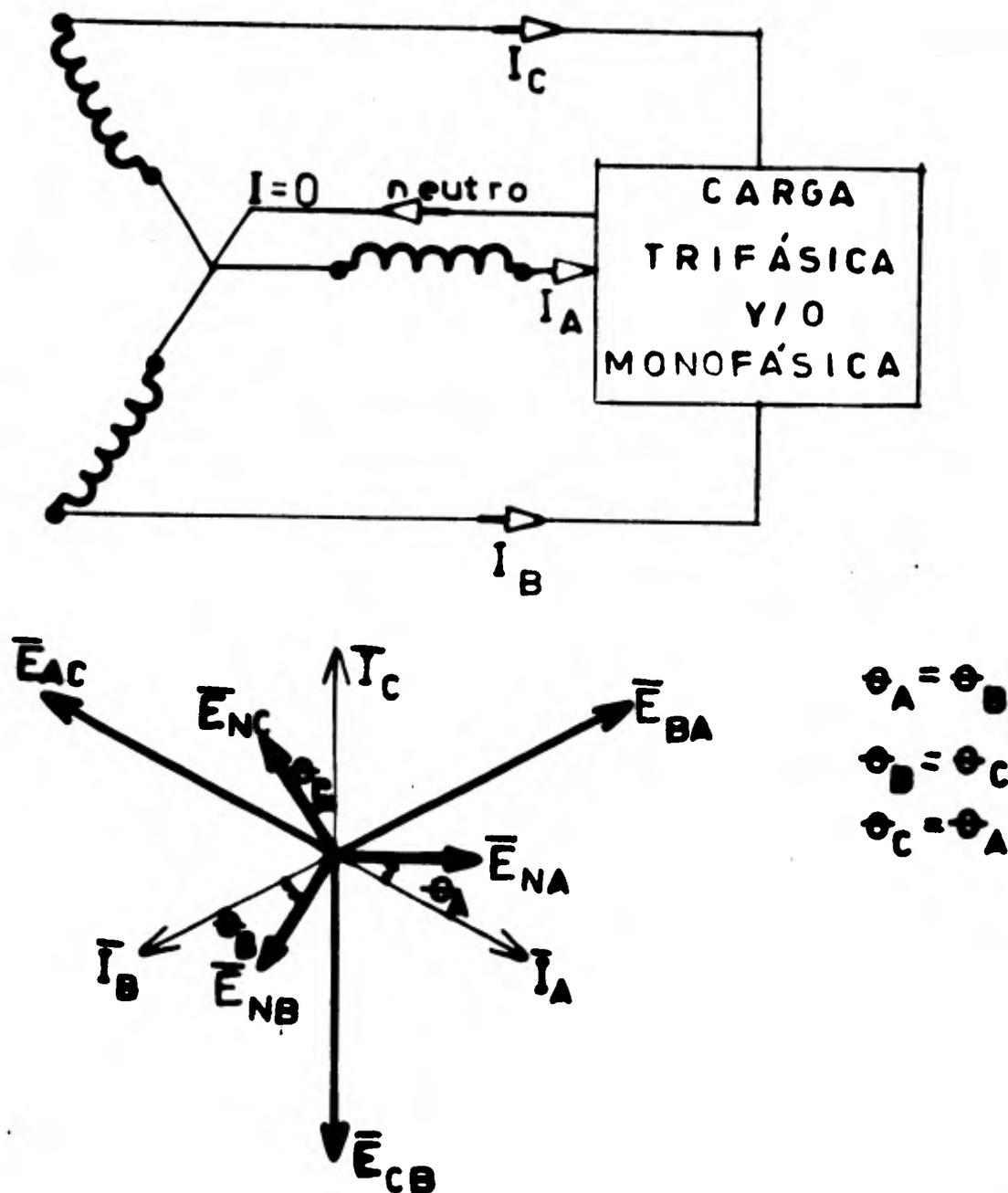


FIG. (1.18) SISTEMA CON CARGA BALANCEADA

Cuando la carga 3ϕ es conectada en estrella es posible conectar su neutro con el del generador. Si las impedancias en cada rama de la estrella son iguales, (carga balanceada) las corrientes en cada rama (fase) serán de igual magnitud pero defasadas 120° entre sí, ya que las corrientes que entran a cada rama de la estre

lla retornan al neutro. En este punto tendremos la suma de tres corrientes $\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C$; la suma de estas tres corrientes fasorialmente queda: como se muestra en la figura (1.19).

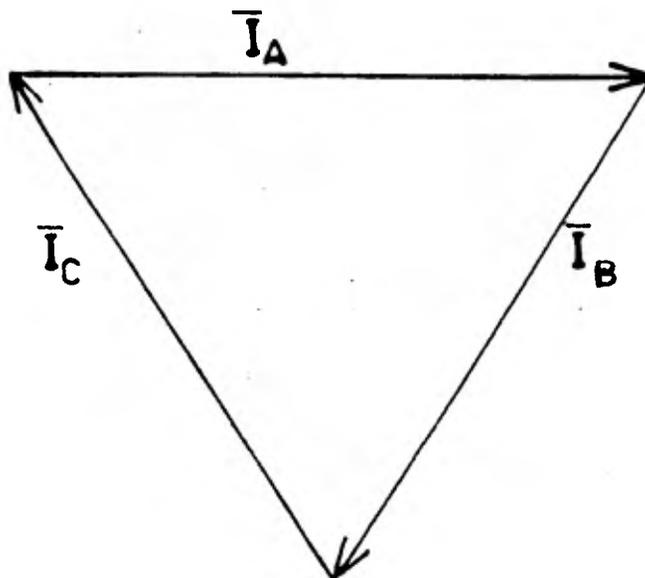


FIG. (1.19) DIAGRAMA FASORIAL DE LA CORRIENTE TRIFÁSICA

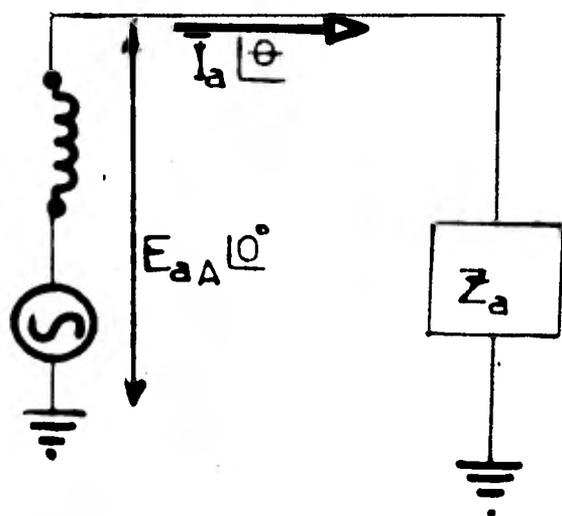
Del diagrama fasorial se ve que $\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0$

Esto implica que el neutro no conduce ninguna corriente, por lo tanto es posible omitirlo (o desconectarlo).

Esta posibilidad de omitir el neutro en los sistemas trifásicos que operan con cargas balanceadas hace posible analizar un sistema 3ϕ (conexión delta o estrella) considerando una sola fase ya que las magnitudes de voltajes y corrientes de ésta fase serán las mismas para las otras dos fases, solo defasadas en 120° ó -120° , respecto a ésta fase considerada.

El diagrama que resulta de analizar una sola fase se llama DIA-

GRAMA UNIFILAR del sistema y se muestra en la figura (1.20).



$$\bar{E}_{bB} = E \angle -120^\circ$$

$$\bar{E}_{cC} = E \angle 120^\circ$$

$$\bar{I}_B = I \angle \theta - 120^\circ$$

$$\bar{I}_C = I \angle \theta + 120^\circ$$

FIG. (1.20) DIAGRAMA UNIFILAR DE UN SISTEMA TRIFÁSICO

CONEXION DELTA

Si los tres devanados monofásicos (idénticos) de un generador -- trifásico son conectados como se muestra en la figura (1.21) o -- sea A conectado con c y C conectado con b el voltaje en los extremos abiertos a y B ha de ser nulo (ésto lo podemos observar claramente en el diagrama fasorial). Esto significa que --- cuando los extremos abiertos a y B se unen formando una malla- (delta) dado que estos puntos se encuentran al mismo potencial -- no circulará corriente dentro de la malla.

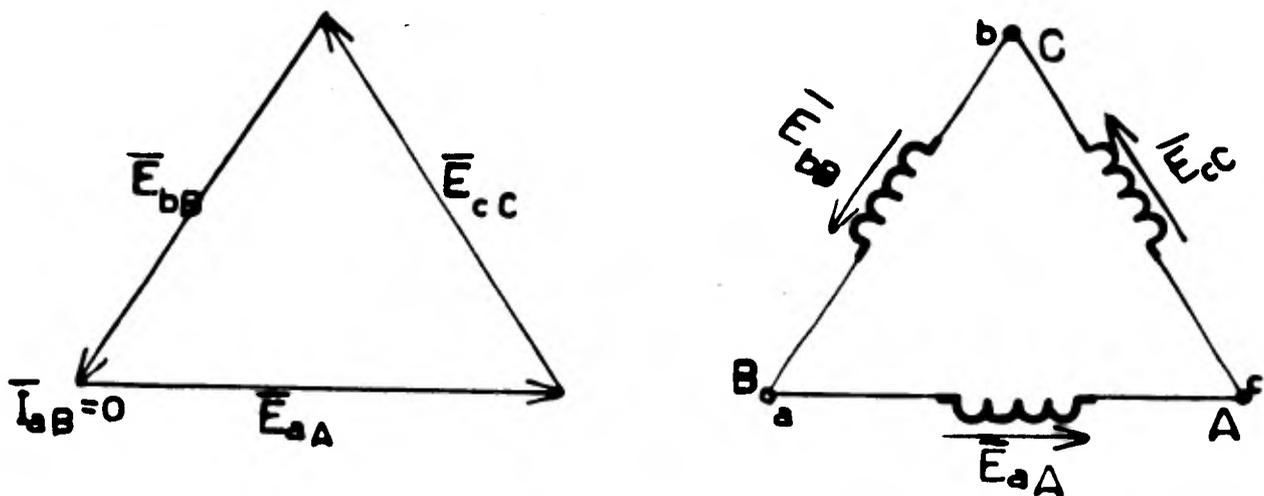


FIG. (1.21)

Las tres esquinas de la delta se usan como las terminales de una fuente de voltaje 3 ϕ (cuyos voltajes son iguales en magnitud y están defasados 120° entre si).

Cuando al sistema se conecta una carga 3 ϕ conectada en forma de delta ó estrella (sin neutro), como se muestra en la fig. (1.22) si las tres impedancias de la delta (o estrella) son iguales el sistema será balanceado.

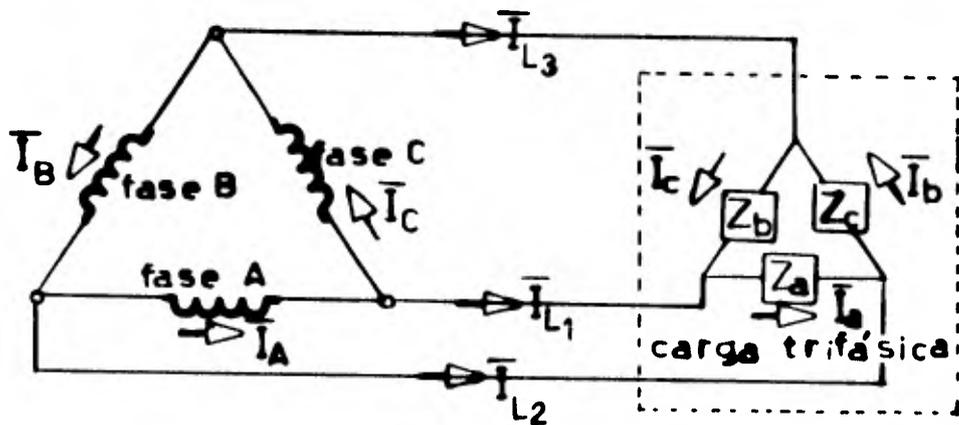


FIG. (1.22)

Del diagrama se observa que

$$\bar{I}_{L3} = \bar{I}_C - \bar{I}_B$$

$$\bar{I}_{L1} = \bar{I}_A - \bar{I}_C$$

$$\bar{I}_{L2} = \bar{I}_B - \bar{I}_A$$

asi
$$\bar{I}_{L1} + \bar{I}_{L2} + \bar{I}_{L3} = 0$$

el diagrama fasorial es el mostrado en la figura (1.23).

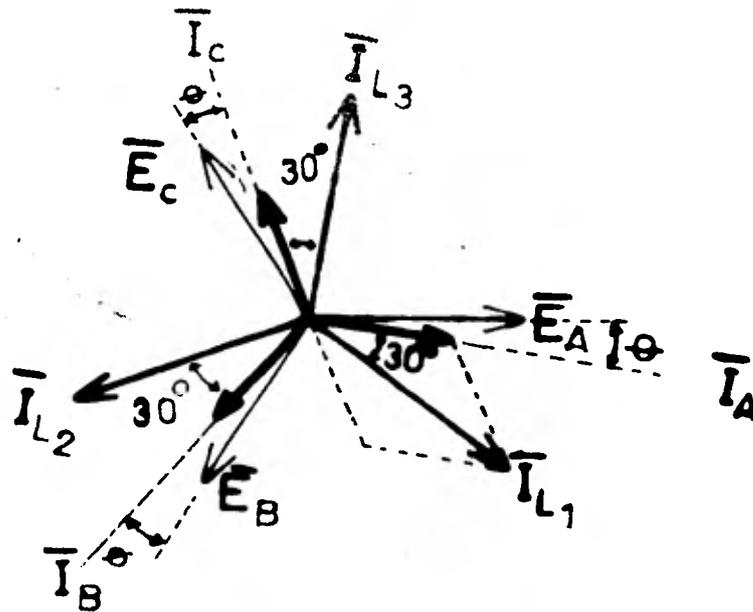


FIG. (1.23)

De este diagrama podemos observar que las corrientes de línea - \bar{I}_{L1} , \bar{I}_{L2} , \bar{I}_{L3} están retrasadas 30° respecto a \bar{I}_A , \bar{I}_B e \bar{I}_C respectivamente.

Ya que el sistema es balanceado

$$\bar{I}_A = \bar{I}_B = \bar{I}_C = \bar{I}_{FASE}$$

Además

$$I_{L1} = I_{L2} = I_{L3} = I_{LINEA}$$

Del diagrama se obtiene que $I_{LINEA} = \sqrt{3} I_{FASE}$ (1.32)

POTENCIA REAL Y REACTIVA EN SISTEMAS DE CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICOS EQUILIBRADOS.

Consideremos el sistema trifásico (3ϕ) equilibrado representado por los fasores mostrados en la figura (1.24).

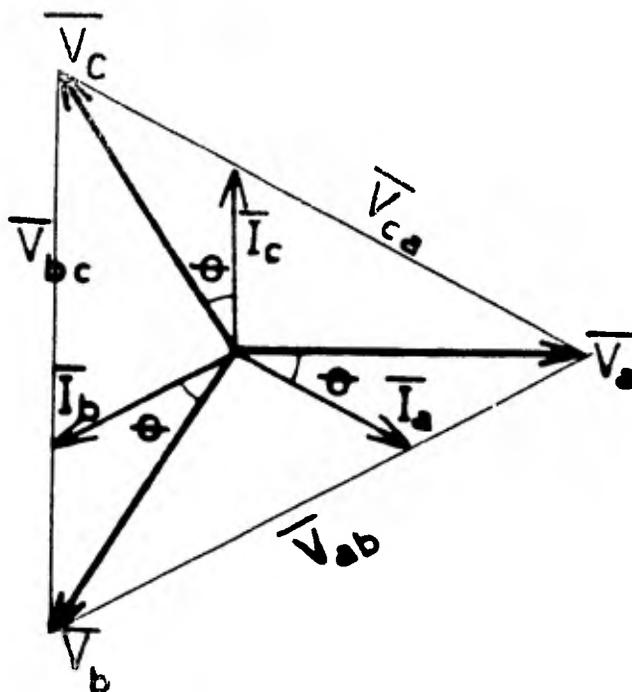


FIG. (1.24)

Se llama POTENCIA REAL TRIFÁSICA a la suma de las potencias reales de cada una de las tres fases, o sea:

$$P_{3\phi} = V_a I_a \cos \theta + V_b I_b \cos \theta + V_c I_c \cos \theta$$

asi $P_{3\phi} = 3 V_a I_a \cos \theta$ (1.33)

en donde $V_a = V_b = V_c$

$$I_a = I_b = I_c$$

Ya que el sistema es balanceado.

donde V_a = es el valor eficaz de voltaje de una fase al neutro.

I_a = es el valor eficaz de corriente de la fase correspondiente.

θ = es el ángulo que hay entre el voltaje y corriente -- (I_a , V_a), o sea el ángulo que se adelanta o atrasa la corriente respecto al voltaje.

Esta potencia real trifásica, puede expresarse en función del -- voltaje entre fases.

Y ya que el voltaje entre fases es el voltaje de una fase al neutro multiplicado por $\sqrt{3}$. $V_{ab} = V_a \sqrt{3}$.

$$\text{Con ésto tenemos: } P_{3\phi} = 3 V_a I_a \cos \theta \quad (1.34)$$

$$\text{o bien } P_{3\phi} = \sqrt{3} V_{ab} I_a \cos \theta \quad (1.35)$$

Por lo que respecta a la potencia reactiva también se llama POTENCIA REACTIVA TRIFASICA a la suma de las potencias reactivas de cada una de las tres fases.

$$Q_{3\phi} = V_a I_a \sin \theta + V_b I_b \sin \theta + V_c I_c \sin \theta$$

$$Q_{3\phi} = 3 V_a I_a \sin \theta$$

Expresando la potencia reactiva en función del voltaje entre fases obtenemos una expresión análoga.....

$$Q_{3\phi} = 3 V_a I_a \sin \theta \quad (1.36)$$

$$\text{o bien } Q_{3\phi} = \sqrt{3} V_{ab} I_a \sin \theta \quad (1.37)$$

La potencia aparente trifásica resulta de sumar la potencia aparente de cada una de las tres fases.

$$S_{3\phi} = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c$$

$$S_{3\phi} = 3 V_a I_a \quad (1.38)$$

$$\text{o bien} \quad S_{3\phi} = \sqrt{3} V_{ab} I_a \quad (1.39)$$

9. FACTOR DE POTENCIA.

Como se vió en párrafos anteriores, en las redes eléctricas existen cargas resistivas y cargas reactivas. Una carga real puede considerarse compuesta por una carga resistiva ideal en paralelo con una carga reactiva ideal.

A frecuencias de 50 ó 60 hertz algunas cargas reales, tales como lámparas incandescentes y aparatos de calefacción, tienen un comportamiento practicamente resistivo. Sin embargo en las cargas representadas por líneas de transmisión y distribución, transformadores, lámparas fluorescentes, motores eléctricos, equipos de soldadura eléctrica, hornos de inducción, bobinas de reactancia, etc., la componente reactiva de la carga suele ser de magnitud comparable a la de la componente resistiva. Si se analiza el circuito en la figura (1.25).

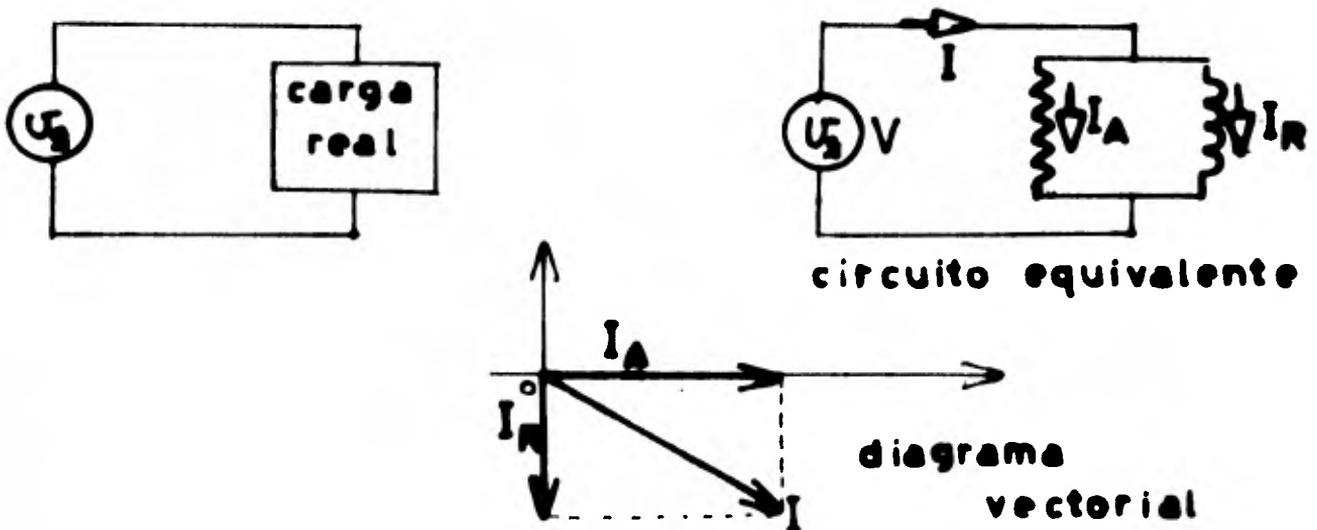


FIG. (1.25)

Como se vió en el análisis de potencia, la energía útil es consumida por los elementos resistivos. Esta energía útil es proporcionada por la corriente I_A . En el elemento reactivo el consumo neto de energía es nulo ya que ésta oscila entre éste elemento y la fuente de suministro.

De la figura (1.25) podemos observar que por el elemento reactivo circula una componente de la corriente total (I) que es la corriente reactiva (I_R). Esta corriente en los circuitos inductivos es necesaria para producir los campos magnéticos que son la base para el funcionamiento de muchos dispositivos electromagnéticos.

Suponiendo una alimentación a una planta industrial representada por el esquema de la figura (1.26).

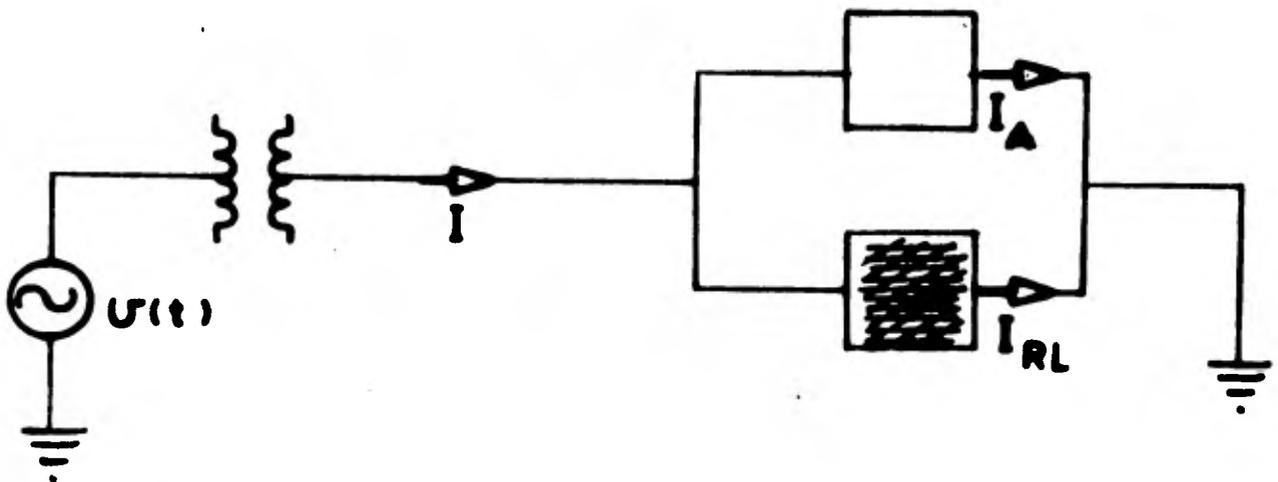


FIG. (1.26)

donde: I = es la corriente total generada
 I_A = es la corriente activa
 I_{RL} = es la corriente reactiva de tipo inductivo.

$$\text{Si} \quad S = VI^* \quad (1.40)$$

$$\text{además de } \bar{I} = \bar{I}_A + \bar{I}_{RL} \quad \bar{I}^* = \bar{I}_A^* + \bar{I}_{RL}^*; \quad \bar{I}\bar{I}^* = I^2$$

I_{RL} representa una carga adicional de corriente para el cableado en las instalaciones industriales, los transformadores de potencia, las líneas de transmisión y los generadores

$$\text{Así} \quad S = \bar{V} \bar{I}_A^* + \bar{V} \bar{I}_{RL}^* \quad (1.41)$$

con $\bar{V} \bar{I}_A^*$ como la potencia activa

$\bar{V} \bar{I}_{RL}^*$ como la potencia reactiva (inductiva)

la expresión (1.40) se puede expresar en términos de la corriente total como: $S = V I \angle -\theta$.

$$\text{o sea} \quad S = VI \cos \theta + j VI \sin \theta \quad (1.42)$$

como recordaremos; $VI \cos \theta = P$ potencia activa
 $VI \sin \theta = Q$ potencia reactiva

estas expresiones en la ecuación (1.42).

$$S = P + jQ \quad (1.43)$$

en forma vectorial se puede obtener el diagrama mostrado en la figura (1.27).

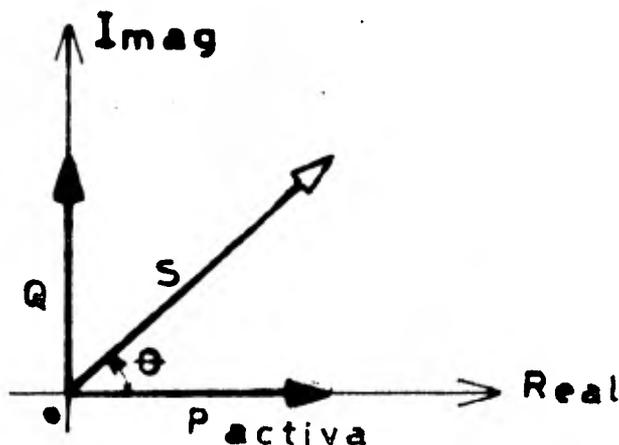


FIG. (1.27)

El diagrama anterior permite apreciar que la energía suministrada (S) no se utiliza en su totalidad para producir potencia activa en el sistema. Entonces una medida útil que nos indica el porcentaje de conversión de potencia suministrada en potencia activa es la relación: $\frac{P}{S} = \frac{VI \cos \theta}{VI}$.

o sea
$$\frac{P}{S} = \cos \theta \quad (1.44)$$

Este resultado a que se ha llegado está en función del ángulo θ de retraso que sufre la corriente total respecto al voltaje aplicado en el sistema industrial. El coseno de este ángulo θ es el llamado FACTOR DE POTENCIA. Otra forma de expresarlo es:

$$f \cdot p = \frac{\bar{V} I_A^*}{\bar{V} I_A + \bar{V} I_{RL}}$$

o bien
$$f \cdot p = \frac{I_A^*}{I_A^* + I_{RL}^*} \quad (1.45)$$

Esto quiere decir que el f.p. depende de la magnitud en las corrientes reactivas como se indica en la relación anterior.

Así en una planta industrial un bajo factor de potencia implica un consumo alto de corriente reactiva y por lo tanto un riesgo de incurrir en pérdidas excesivas sobre cargas en equipos eléctricos y líneas de transmisión y distribución. Esto se traduce en la necesidad de invertir en nuevos equipos si la potencia demandada llega a sobrepasar la capacidad de los equipos ya existentes.

CAPITULO II
REPERCUSIONES DE UN BAJO FACTOR DE POTENCIA
EN LOS SISTEMAS ELECTRICOS INDUSTRIALES

Existen varios efectos que se presentan en los sistemas que operan con un bajo factor de potencia, dichos efectos causan una deficiente operación del sistema y en ocasiones, además un aumento de los costos por la mala utilización de la energía eléctrica; ya que la compañía suministradora impone multas a los usuarios por operar con un f.p. inferior a 0.85. En éste capítulo analizaremos los aspectos técnico-económicos que estas deficiencias nos significan.

Los sistemas que operan con bajo f.p. presentan los siguientes síntomas:

1. Disminución de la capacidad para manejar potencia activa.
2. Mala regulación de voltaje.
3. Aumento de pérdidas por efecto Joule.

Los efectos anteriores son además los causantes de que la compañía suministradora imponga multas por operar con bajo f.p., con objeto de que los usuarios lo mantengan lo más alto posible y que, tanto consumidor como suministrador eviten los efectos anteriores.

1. DISMINUCION EN LA CAPACIDAD PARA MANEJAR POTENCIA ACTIVA.

En los sistemas eléctricos industriales regularmente la manera de alimentar a las cargas es usando dispositivos tales como:

- transformadores
- interruptores
- líneas de alimentación (conductores), etc.

La capacidad de éstos elementos esta determinada por los KVA que pueden transportar; estos KVA son los nominales para los

que fueron diseñados. Si el sistema opera con bajo f.p. estos elementos, además de la corriente activa I_A , conducen una corriente reactiva I_L ; ésto, en consecuencia disminuye la capacidad para conducir más corriente activa.

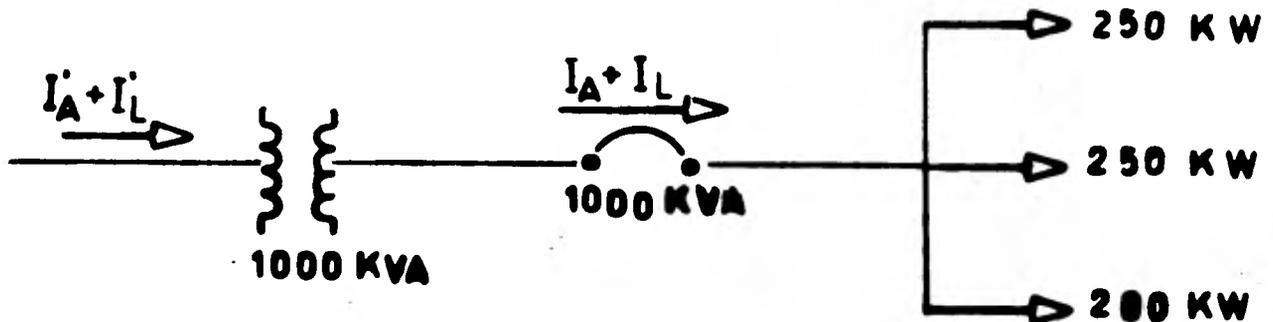


FIG. (2.1)

Por ejemplo:

En el diagrama unifilar mostrado en la figura (2.1) se tiene un sistema eléctrico que alimenta una carga total de 700 KW a un f.p. = 0.7.

El transformador de alimentación es de 1000 KVA, y en las condiciones en que se encuentra la carga por el transformador pasan:

$$KVA_T = \frac{700 \text{ KW}}{0.7}$$

y de aquí $KVA_T = 1000 \text{ KVA}$.

Esto significa que el transformador se encuentra saturado, así como también la capacidad, tanto del alimentador general como de los interruptores de protección.

Si por alguno de los métodos que veremos posteriormente, cambiamos el f.p. de 0.7 a 0.95

$$KVA_T = \frac{700}{0.95} ; KVA_T = 736 \text{ KVA.}$$

lo que significa que el transformador, el interruptor y las líneas eléctricas soportarán un aumento de carga de 264 KVA; de esta manera ha aumentado la capacidad para transportar potencia activa en el sistema, sin conectar otro transformador en paralelo con el anterior y utilizando el mismo interruptor general.

El aumento de potencia útil en el sistema está dado por la expresión:

$$\Delta P = P_2 - P_1 ; \text{ ó bien } \Delta P = S \cdot \Delta \text{ f.p.}$$

asi que
$$\therefore \Delta P = 100 \times \left(\frac{\text{f.p}_2}{\text{f.p}_1} - 1 \right) \quad (2.1)$$

donde: f.p.₂ es el f.p. final
f.p.₁ es el f.p. inicial

Asi en el ejemplo anterior vimos que después de corregir el f.p. a 0.95 quedaron disponibles 264 KVA. Si conectamos una carga que consuma 185 KW a un f.p. = 0.7 los KVA necesarios serían 264 KVA precisamente, los mismos que el transformador podría suministrar.

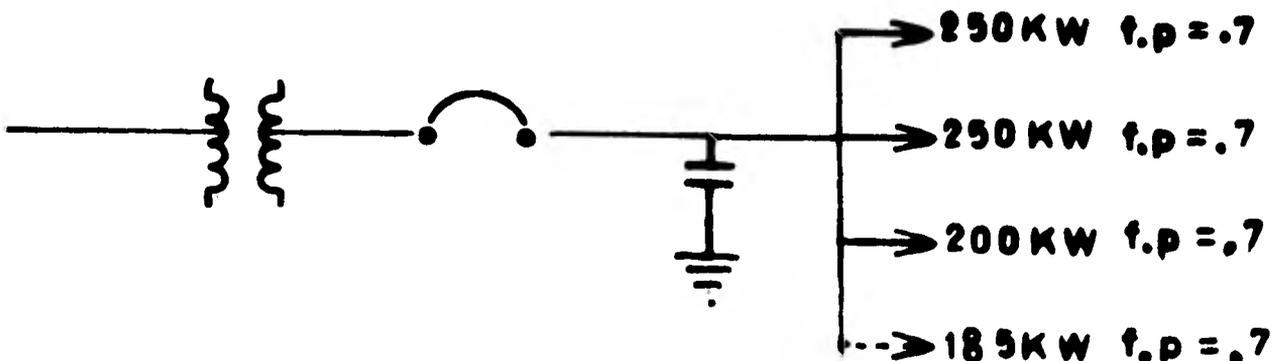
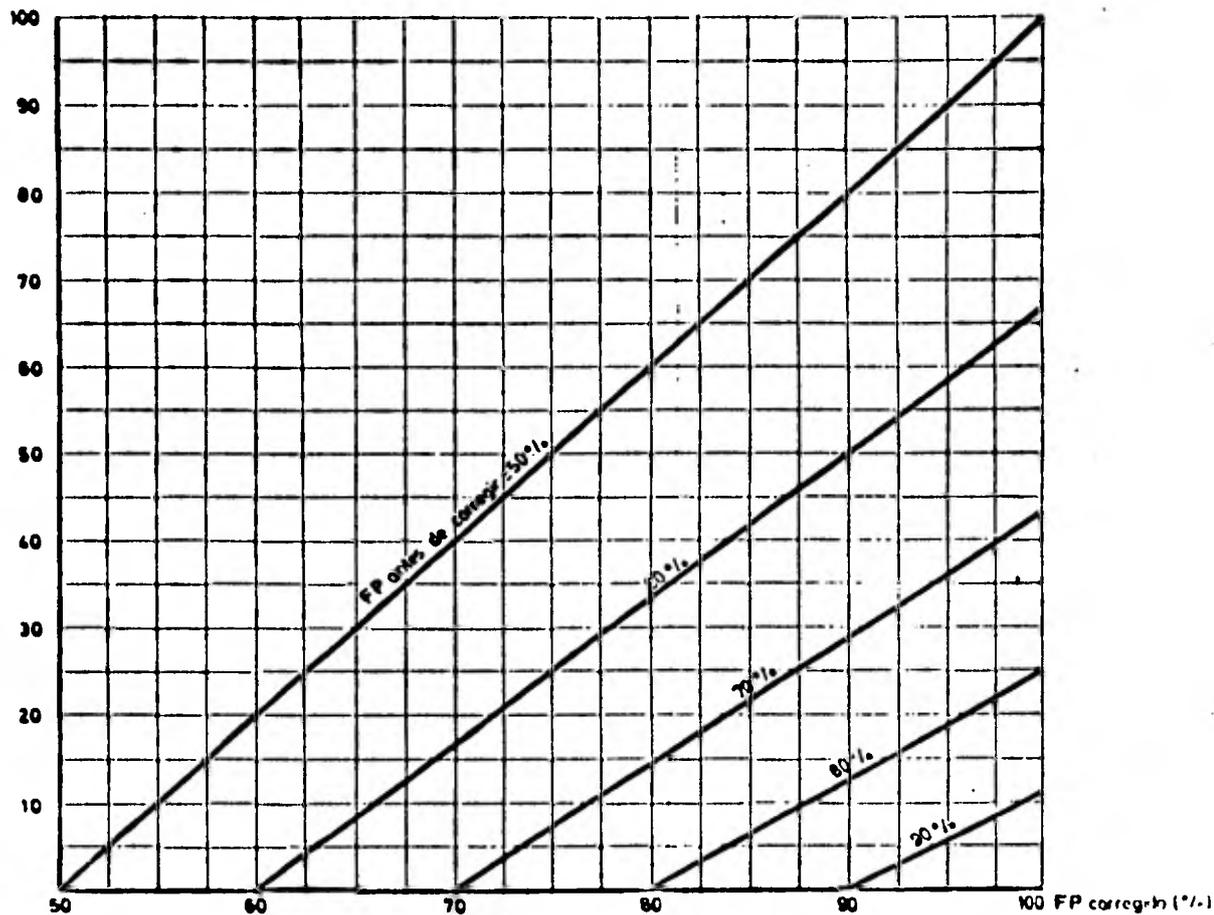


FIG. (2.2)

$\Delta KW (\%)$ 

Incremento de carga en Kilowatts, que todavía puede instalarse en un transformador saturado, si se corrige el Factor de Potencia de la carga, por medio de capacitores de potencia.

$$\Delta KW (\%) = 100 \left(\frac{\text{F.P. corregido}}{\text{F.P. antes de corregir}} - 1 \right)$$

TABLA (2.A)

Hasta antes de conectar la carga teníamos un f.p. de 0.95. Con la nueva carga el f.p. adquirió un valor de 0.88. Al aplicar la expresión (2.1) ... $\Delta P = \left[\frac{.88}{.7} - 1 \right] \times 100$ esto nos dá $\Delta P = 25$, o sea que hemos aumentado en 25% la potencia activa que puede -- transportar el equipo.

En la tabla siguiente (2.A), se muestran los valores del f.p. al que hay que llegar, partiendo del inicial, para obtener un aumento de capacidad de potencia activa en el equipo de alimentación.

Debe hacerse notar que éste método de aumentar la capacidad para manejar potencia activa en un sistema eléctrico presenta la desventaja de que si por alguna razón el dispositivo de compensación falla, saliendo de operación, el sistema se verá sobrecargado haciendo operar las protecciones en el mejor de los casos, -- sacando de servicio toda la instalación compensada.

2. DEFICIENTE REGULACION DE VOLTAJE

Otro efecto que produce el bajo f.p. es la gran caída de potencial en las líneas de alimentación y transformadores.

Este es un fenómeno indeseable que afecta grandemente el funcionamiento de los dispositivos eléctricos alimentados. En los motores de inducción que operan con voltaje menor al nominal aumenta la corriente demandada por estos, para un par determinado; -- en sistemas de iluminación incandescente disminuye la intensidad de iluminación. En hornos eléctricos disminuye la capacidad de calentamiento, etc.

Consideremos el siguiente sistema eléctrico:

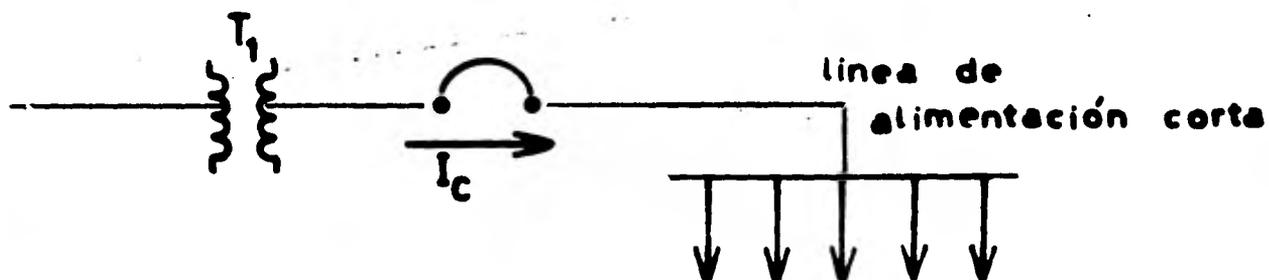


FIG. (2.3)

el diagrama de impedancia será:

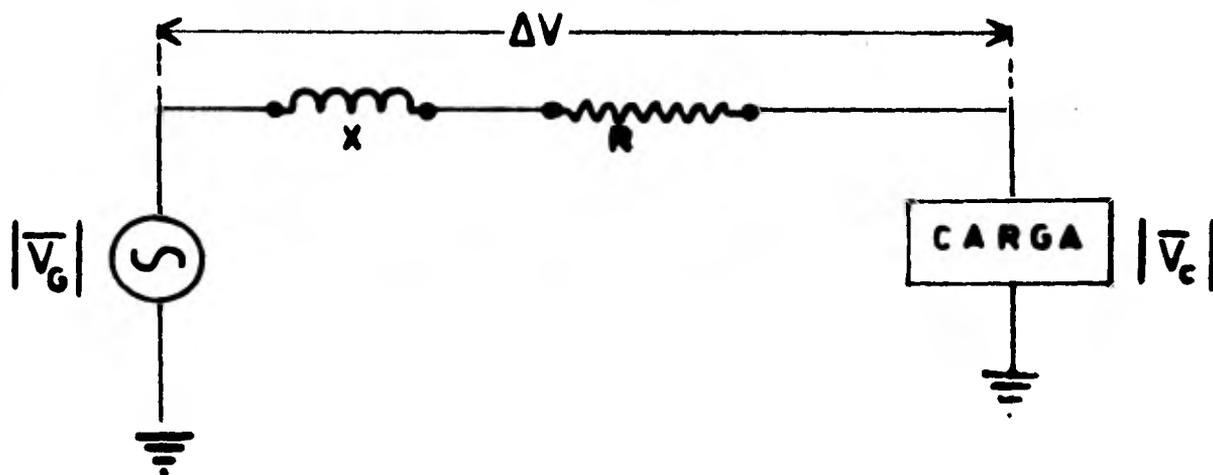


FIG. (2.4)

con: V_G = voltaje en el secundario del transformador

V_C = voltaje en la carga

X = reactancia inductiva equivalente (del transformador + la de la línea).

R = resistencia equivalente.

Así, partiendo del circuito equivalente anterior analizaremos diversos aspectos importantes de este efecto.

El diagrama fasorial del circuito equivalente es de la siguiente manera para f.p. atrasado:

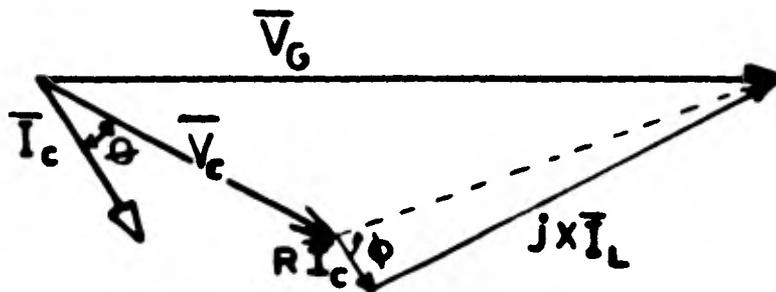


FIG. (2.5)

Del diagrama fasorial mostrado en la figura (2.5) podemos observar que $|\vec{V}_C|$ (voltaje en la carga) depende de varios factores:

- factor de potencia (f.p.)
- valor de los parámetros R , X_L
- corriente demandada por la carga I_C

Analicemos los puntos (a) y (c) por ser éstos los que involucran una corrección en el f.p.; el punto (b) se refiere al valor del ángulo $\phi = \tan^{-1} \frac{X_L}{R}$, el cual afecta al voltaje V_C si de alguna manera se varía.

a.- Voltaje en la carga en función del f.p.

El siguiente análisis se hará bajo la suposición de que el voltaje V_G y la corriente I_C se mantienen constantes.

Considerar el siguiente circuito:

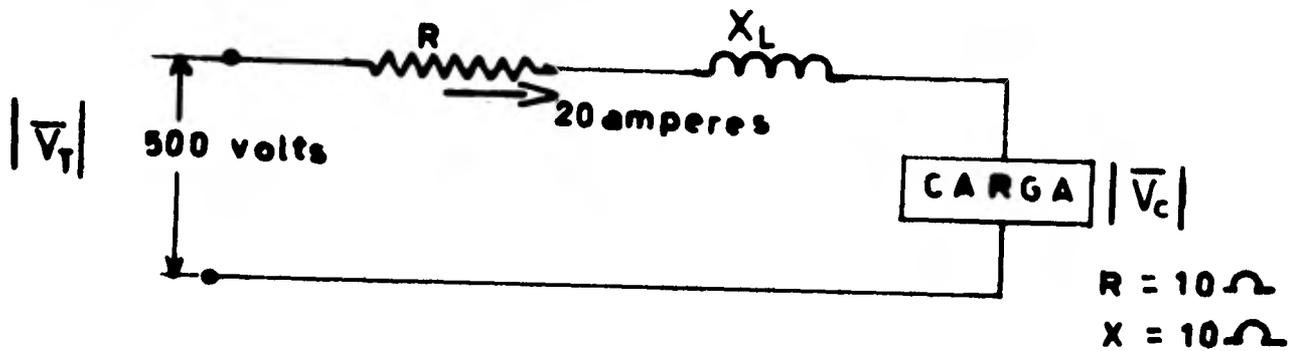


FIG. (2.6)

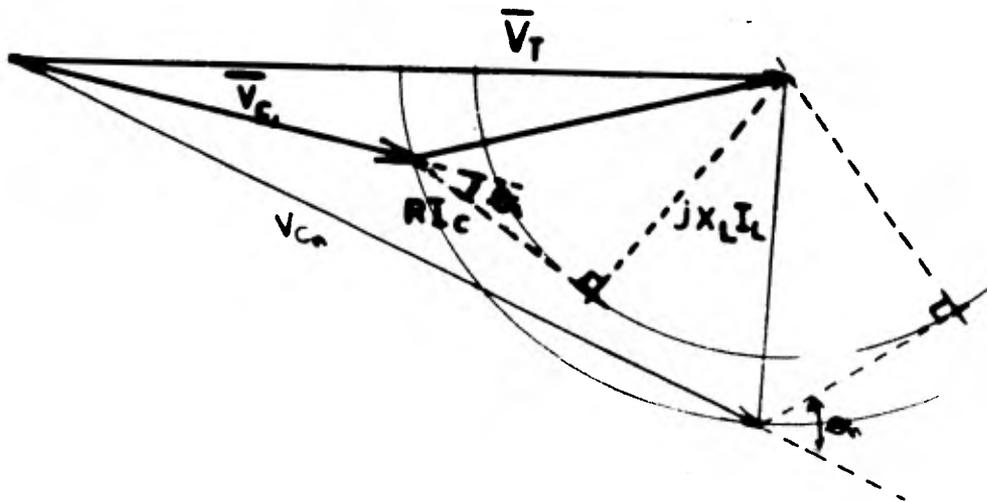


FIG. (2.7)

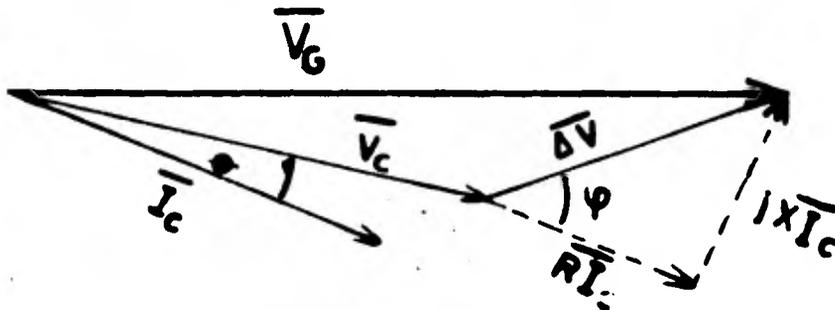


FIG. (2.9)

Con
$$\bar{V}_G = \bar{V}_C + \Delta \bar{V}$$

como
$$\Delta \bar{V} = R\bar{I}_C + j X\bar{I}_C$$

siendo
$$\bar{V}_G = \text{constante}$$

$$\bar{V}_G = \bar{V}_C + \bar{I}_C (R_C + jX) \quad (2.2)$$

$$\therefore \bar{V}_C = \bar{V}_G - \bar{I}_C (R_C + jX) \quad (2.2a)$$

De la expresión (2.2a) se deduce que si la corriente demandada -- por la carga aumenta en magnitud manteniendo constantes los ángulos θ y ϕ y además, como ya señalamos, V_G es constante, el voltaje en la carga V_C disminuirá su magnitud con lo que la regulación en la carga se ve sumamente afectada.

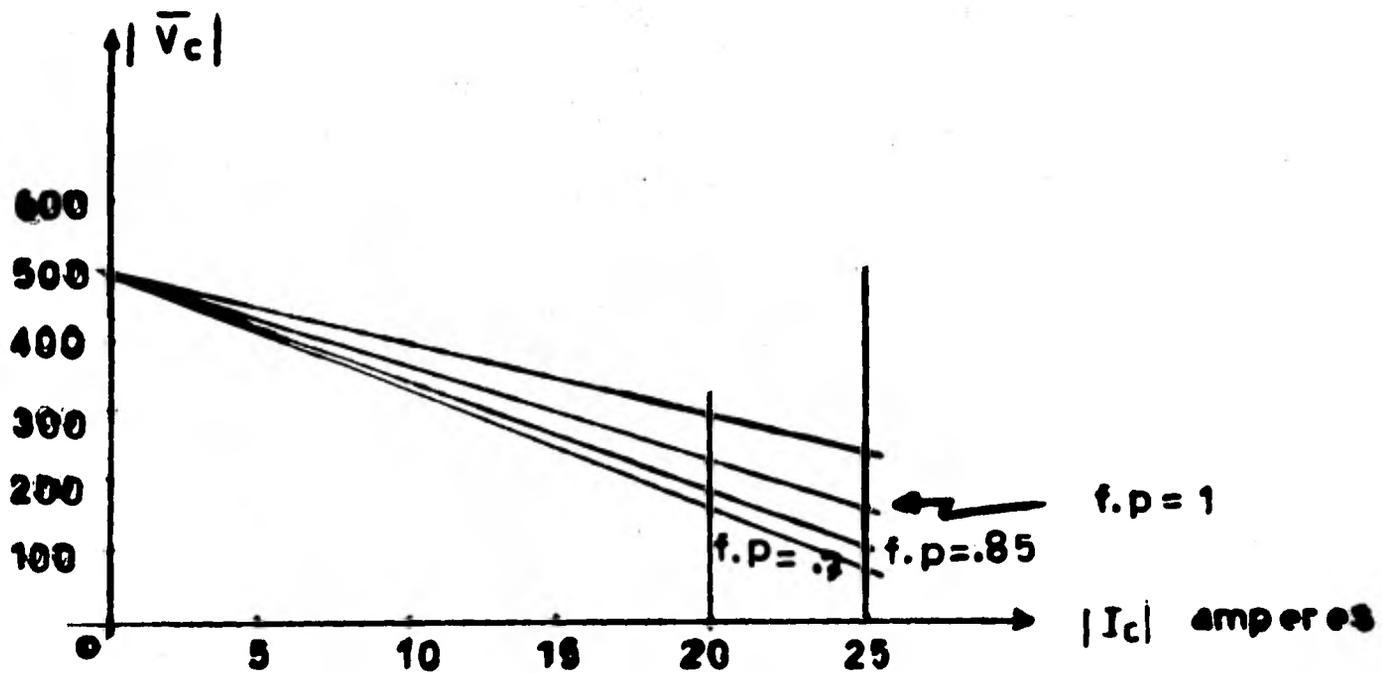


FIG. (2.10)

GRAFICA DEL MODULO DE LA ECUACION (2.2a) (V_C)

con

$$R = 10\Omega$$

$$X = 10\Omega$$

$$V_G = 500 \text{ Volts}$$

CALCULO DE LA REGULACION

Con la expresión: $\% R = \frac{|\bar{V}_G| - |\bar{V}_C|}{|\bar{V}_C|} \times 100$ (2.3)

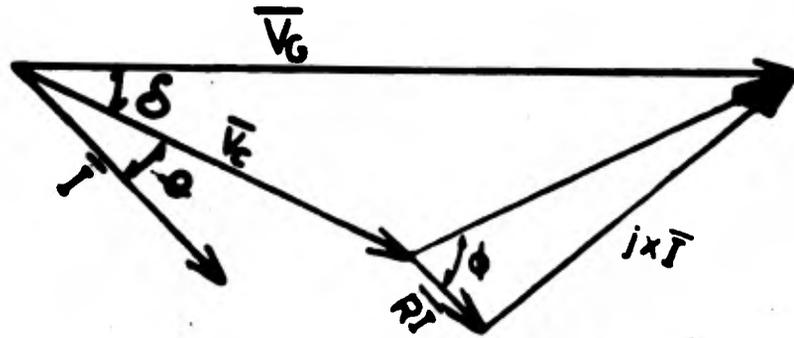


FIG. (2.11)

$$|V_G| = |V_C| \cos \delta + R I \cos (\delta + \theta) + X I \sin (\delta + \theta) \quad (2.3a)$$

en la práctica δ suele ser muy pequeño, de modo que

$$V_C \cos \delta \text{ tiende a } V_C; \quad (\cos 0^\circ = 1)$$

así

$$|V_G| - |V_C| = R I \cos \theta + X I \sin \theta$$

substituyendo en (2.3) $R = \frac{R I \cos \theta + X I \sin \theta}{V_C}$

como

$$P = V_C I \cos \theta$$

se obtiene que

$$I = \frac{P}{V_C \cos \theta}, \text{ así substituyendo en } R.$$

$$R = \frac{R}{V_C^2} P + \frac{R}{V_C^2} P \tan \theta \quad (2.3b)$$

En la práctica debe lograrse que R no sobrepase un valor prefijado.

jado (bastante pequeño), manteniéndose V_C prácticamente constante.

La máxima potencia transportable por una línea dada sin sobrepasar este valor de R la obtendremos cuando se anule la componente X de la línea y/o se anule el ángulo θ ; ésta potencia viene dada por la expresión:

$$R = \frac{R}{V_C^2} P_{\text{máx}}, \quad (2.4)$$

o sea

$$P_{\text{máx}} = \frac{R V_C^2}{R}$$

Substituyendo la expresión (2.4) $R = \frac{R}{V_C^2} P_{\text{máx}}$ en la expresión

$$R = \frac{R}{V_C} P + \frac{X}{V_C} P \tan \theta$$

se tendrá

$$\frac{R}{V_C^2} P_{\text{máx}} = \frac{R}{V_C} P + \frac{X}{V_C} P \tan \theta \quad (2.4a)$$

simplificando:

$$\frac{R}{V_C^2} P_{\text{máx}} = \frac{P}{V_C} (R + X \tan \theta)$$

$$P (R + X \tan \theta) = R P_{\text{máx}}$$

$$P = \frac{R P_{\text{máx}}}{R + X \tan \theta}$$

$$\therefore P = \frac{P_{\text{máx}}}{1 + \frac{X}{R} \tan \theta}$$

$$\frac{X}{R} = \tan \phi$$

entonces:

$$P = \frac{P_{\text{máx}}}{1 + \tan \phi \tan \theta} \quad (2.5)$$

Esta expresión aproximada proporciona errores despreciables siempre que se opere con valores de R del orden de 5% y un $\cos \theta$ inferior a 0.95. De lo contrario puede recurrirse a la expresión exacta (2.3)

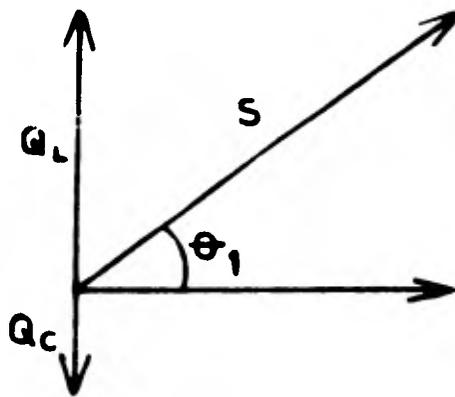
La expresión (2.5) nos permite conocer la potencia activa que es posible transmitir sin llegar a producir una caída de voltaje que sobrepase el porcentaje R . $[P \text{ máx} = f(R)]$ en función del factor de potencia y de $\tan \phi$ a que se realiza el suministro.

En la tabla siguiente se proporcionan cuatro valores máximos de potencia activa que, según éste criterio, es posible transmitir para varias combinaciones de $\cos \theta$ y $\tan \phi$.

$\frac{X}{R} = \tan \phi$	$\cos \theta$	$\frac{KW}{KW \text{ máx}}$
4	0.7	19.7%
4	0.85	28.9%
4	0.95	43.5%
1	0.85	61.9%

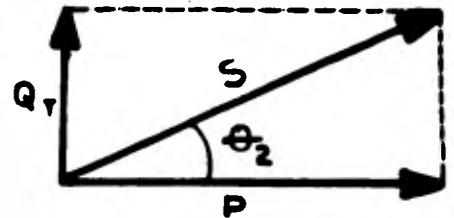
Inversamente de la expresión (2.5) podemos deducir para cada valor de la potencia activa transmitida, el factor $\tan \phi$ a que debe operar la línea (compensación de línea) ó el factor $\tan \theta$ con que debe operar la carga (compensación de carga).

De dicha expresión se deduce que cuando crece la demanda de potencia activa debe disminuir el término $\tan \theta$ ó bien el término $\tan \phi$. Disminuir el término $\tan \theta$ implica aumentar el factor de potencia en horas de mayor demanda. Cuando se suministra potencia reactiva de carácter capacitivo al final de una línea, se mejora el f.p. y se aumenta el nivel de voltaje.



(a)

SUMINISTRO DE POTENCIA REACTIVA
CAPACITIVA



(b)

GRAFICA RESULTANTE

FIG. (2.12)

De la expresión (2.3b)

$$R = \frac{R}{V_C^2} P + \frac{X}{V_C^2} P \tan \theta; \text{ con } R = \frac{V_G - V_C}{V_C}$$

obtenemos:

$$\frac{V_G - V_C}{V_C} = \frac{R}{V_C^2} P + \frac{X}{V_C^2} P \tan \theta$$

si $\tan \theta = \frac{Q_T}{P}$; tendremos:

$$\frac{V_G - V_C}{V_C} = \frac{R}{V_C^2} P + \frac{X}{V_C} Q_T$$

además $Q_T = (Q_L - Q_C)$

De las expresiones anteriores se ve que el aumento de voltaje en-
(%) porcentaje, al reducir la potencia Q_L en una cantidad Q_C ,
es:

$$e = \frac{X}{V_C^2} Q_C \quad (2.6)$$

Donde: X = es la reactancia de la línea
 V_C = es el voltaje nominal de la línea
 Q_C = es la reactancia capacitiva instalada (potencia - reactiva capacitiva)
 ϵ = aumento del voltaje en (%)

3. PERDIDAS EN CONDUCTORES POR EFECTO JOULE

Uno de los aspectos más importantes a considerar en las instalaciones eléctricas de cualquier industria, es el calibre de los conductores que alimentan a los centros de carga, ubicados a distancias considerables de la acometida de la compañía suministradora de la energía, ó de la subestación de la cual parten.

La sección transversal de estos conductores se determina de acuerdo a la corriente demandada por la carga instalada. Si ésta última tiene un bajo f.p. gran parte de la corriente demandada alimentará carga reactiva inductiva que estara circulando en los alimentadores sin producir trabajo. Ahora bien, por la Ley de Joule se ha establecido que la potencia disipada en forma de calor en un conductor depende de la resistencia ohmica de éste y de la corriente que circula por el mismo. De aqui que la corriente demandada por la carga reactiva inductiva aumenta en buena medida las pérdidas por efecto Joule, además obligan a instalar conductores de mayor sección a la necesaria.

Normalmente debido a la necesidad de aumentar la producción las empresas se ven obligadas a instalar más equipos electromecánicos en forma paulatina y que van aumentando la capacidad instalada en la red. Esta carga adicional podría ser alimentada por el mismo alimentador, que inicialmente se instala con capacidad sobrada, pero a menudo la capacidad que tenia disponible para este caso se reduce a causa del bajo factor de potencia con el que opera la carga existente.

Las pérdidas por calor disipado en las líneas se debe tanto a la corriente activa como a la corriente reactiva que circula en ellas

y representan una energía perdida ya que la empresa la paga como si la hubiese transformado en fuerza de trabajo.

Designemos con "p" a las pérdidas y con "k" a la resistencia-ohmica total de las líneas conductoras; se tiene por la Ley de Joule:

$$p = K I_a^2 + k I_\ell^2$$

o sea
$$p = k (I_a^2 + I_\ell^2) \quad (2.7)$$

donde: I_a = es la corriente activa
 I_ℓ = es la corriente inductiva

pero si
$$I^2 = I_a^2 + I_\ell^2$$

entonces
$$p = k (I^2) \quad (2.7a)$$

Ahora bien, suponiendo que de alguna manera se compensan, en gran parte, las corrientes reactivas mejorando el f.p. de la carga. -- Llámase p_1 a las pérdidas e I_1 a la corriente correspondiente ambas al f.p.₁ ($\cos \theta_1$), y p_2 e I_2 a las pérdidas y corriente correspondientes al f.p.₂ ($\cos \theta_2$) obtenido al compensar las cargas reactivas inductivas. Dado que tanto la potencia activa como el voltaje no cambiarían apreciablemente después de haberse mejorado el factor de potencia se tendrá:

$$KW_1 = KW_2$$

o sea
$$\sqrt{3} \text{ KV } I_1 \cos \theta_1 = \sqrt{3} \text{ KV } I_2 \cos \theta_2$$

asi
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} \quad (2.8)$$

Esta expresión relaciona las corrientes totales I_1 e I_2 antes y después de mejorar el f.p.

Una expresión que dá la disminución en las pérdidas de energía -- por efecto Joule, en tanto por ciento, obtenida al mejorar el ---

factor de potencia de un valor $\cos \theta$, al nuevo valor

$$\cos \theta_2 \text{ es: } -\Delta P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100$$

o sea

$$\Delta P = \left[1 - \frac{RI_2^2}{RI_1^2} \right] \times 100 \quad (2.9)$$

aplicando la expresión (2.8) se tiene:

$$\Delta P = \left[1 - \frac{\cos^2 \theta_1}{\cos^2 \theta_2} \right] \times 100 \quad (2.10)$$

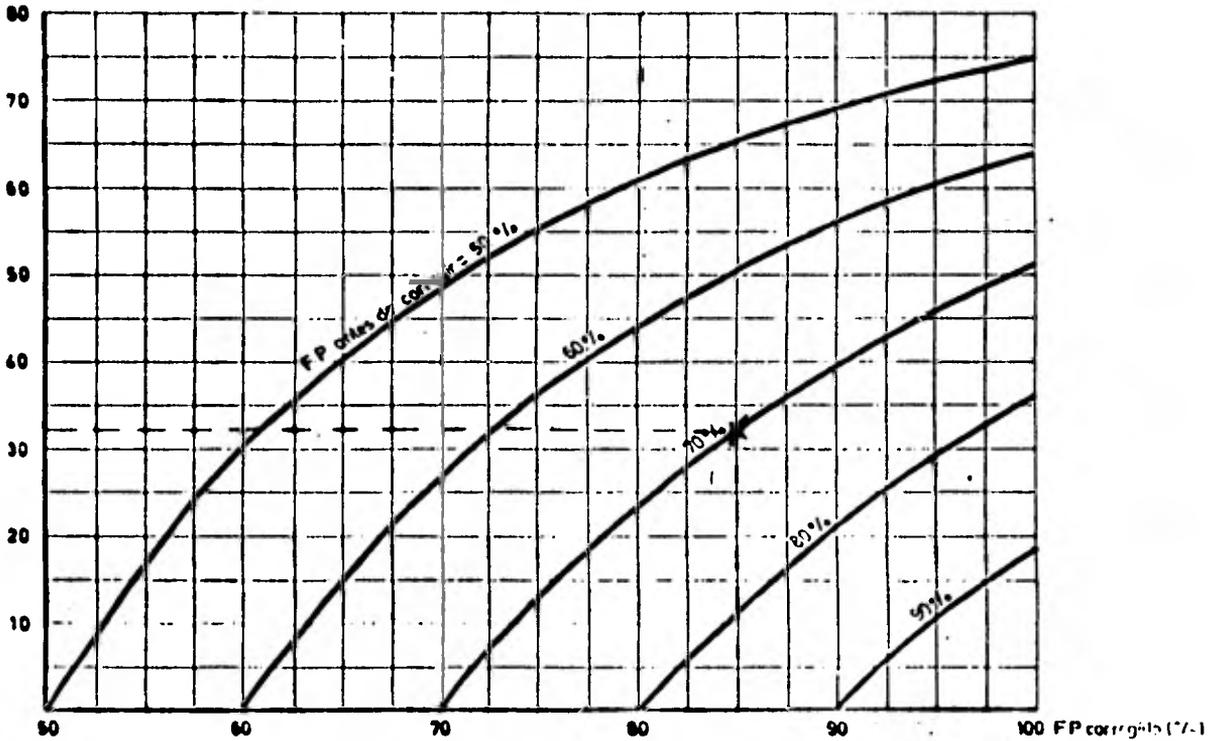
De ésta manera puede comprobarse que el paso de un factor de potencia del 70% al 85%, por ejemplo, produce una disminución de pérdidas por valor de más del 30%; es decir, la distribución de energía se vuelve mucho más económica. En la fig. (2.13) vemos una gráfica de la expresión (2.10).

4. SOBRECARGOS EN LAS TARIFAS DE LA CIA. SUMINISTRADORA POR OPERAR CON BAJO FACTOR DE POTENCIA.

Debido a todas las deficiencias técnicas que se analizaron en los incisos anteriores el Estado autoriza al distribuidor de la energía eléctrica, a cargar una penalidad económica a su usuario, de acuerdo con el criterio de la tarifa eléctrica en vigor en México publicada en el Diario Oficial del 15 de octubre de 1973, el cual estipula lo siguiente:

El consumidor procurará mantener un factor de potencia tan aproximado a 100% como le sea posible; pero en caso de que su factor de potencia, durante cualquier periodo de facturación, tenga un promedio menor de 85% atrasado, determinado por métodos aprobados por la Secretaría de Industria y Comercio, el suministrador tendrá derecho a cobrar al consumidor la cantidad que resulte de multiplicar el monto de la facturación normal por el cociente que se obtenga de dividir la cantidad de 85% entre el f.p. medio atrasado, expresado en %, observado durante el periodo de facturación.

Reducción de
Pérdidas, en %.



Reducción de pérdidas por efecto Joule, obtenida en una instalación industrial, o una línea de distribución de energía eléctrica, al corregir el factor de potencia de la carga, por medio de capacitores de potencia.

$$\Delta P (\%) = 100 \left[1 - \left(\frac{\text{F.P. antes de corregir}}{\text{F.P. corregido}} \right)^2 \right]$$

FIG. (2.13)

En ningún caso se multiplicará la facturación por un valor de es te cociente mayor a 7, aunque este resulte superior.

En servicios donde por primera vez se determine el f.p., y en ca so de que este resulte inferior a 85% atrasado, el suministrador no aplicara dicho procedimiento en las dos primeras facturacio-- nes, pero dará aviso de tal irregularidad al consumidor desde su primera facturación a fin de que lo corrija.

Ejemplo:

En la facturación cuyo recibo se ilustra en la figura (2.14), -- aparece una facturación normal de \$ 20,570.00 por el consumo de- 57,000 kwh-mes.

El consumo de kvarh-mes fué de 73,318.

De acuerdo a los kwh y kvarh consumidos durante el mes podemos es tablecer lo siguiente:

$$(f.p.)_{mes} = \frac{(kwh)_{mes}}{\sqrt{(kwh)^2 + (kvarh)^2}}$$

Sustituyendo:

$$(f.p.)_{mes} = 0.6137$$

De acuerdo a lo estipulado en el reglamento la sobrefacturación - será:

$$\left(\frac{0.85}{0.6137} - 1 \right) 20,570 = \$ 7,917.00$$

Por lo tanto el consumidor tendrá que pagar

$$\$ 28,488.25$$

De este ejemplo es fácil concluir que la sobrefacturación es una

de las repercusiones mas importantes que nos obligarán a corregir el bajo factor de potencia.

COMPANIA DE LUZ Y FUERZA DEL CENTRO, S. A.																																																																					
CALZ. MELCHOR OCAMPO No. 171 MEXICO 17 D.F.	APARTADO POSTAL No. 490 ZONA POSTAL No. 1	Cod. Ing. Merc. No. 54175																																																																			
CASA SANCHEZ PEREZ, S.A. Montevideo No. 345 Cuidad Serdán, Pue.			Cta. 001-020-14																																																																		
<p>POR LA ENERGIA ELECTRICA SUMINISTRADA DURANTE EL PERIODO COMPRENDIDO DEL 10 DE FEBRENO DE 1974 AL 04 DE MARZO DE 1974</p> <p style="text-align: center;">TARIFA 8 DEMANDA 470 KW</p> <p>MEDS. NOS. LECT. ANT. LECT. ACT. CONST.</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%;">925957</td> <td style="width: 10%;">00</td> <td style="width: 10%;">15</td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> </tr> <tr> <td>925058</td> <td>00</td> <td>22</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>925059</td> <td>00</td> <td>20</td> <td>1000.0</td> <td>-----</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>57000 KWH</td> <td></td> </tr> <tr> <td>1920558</td> <td></td> <td>360</td> <td>1000.0</td> <td>360 KW</td> <td></td> </tr> <tr> <td>9005071</td> <td>00</td> <td>40</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>9005072</td> <td>00</td> <td>38</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>9005073</td> <td>00</td> <td>49</td> <td>577.3</td> <td>-----</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>73318 KVARH</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="3">DE 02-10-74 a 03-04-74 22 ds. D-470</td> <td>57000 KWH</td> <td></td> <td style="text-align: right;">\$20,570.90</td> </tr> <tr> <td colspan="5">SALDO A PAGAR:</td> <td style="text-align: right;">\$28,488.25</td> </tr> </table>				925957	00	15				925058	00	22				925059	00	20	1000.0	-----						57000 KWH		1920558		360	1000.0	360 KW		9005071	00	40				9005072	00	38				9005073	00	49	577.3	-----						73318 KVARH		DE 02-10-74 a 03-04-74 22 ds. D-470			57000 KWH		\$20,570.90	SALDO A PAGAR:					\$28,488.25
925957	00	15																																																																			
925058	00	22																																																																			
925059	00	20	1000.0	-----																																																																	
				57000 KWH																																																																	
1920558		360	1000.0	360 KW																																																																	
9005071	00	40																																																																			
9005072	00	38																																																																			
9005073	00	49	577.3	-----																																																																	
				73318 KVARH																																																																	
DE 02-10-74 a 03-04-74 22 ds. D-470			57000 KWH		\$20,570.90																																																																
SALDO A PAGAR:					\$28,488.25																																																																

FIG. 2.14 EJEMPLO DE FACTURACION CON SOBRECARGO

CAPITULO III

METODOS DE DETECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

El factor de potencia de cualquier instalación industrial suele - sufrir variaciones cuya intensidad depende de los equipos instalados y del régimen de trabajo en la misma, por consiguiente es preciso, en cada caso particular, determinar bajo que condiciones es conveniente medirlo.

Existen varios métodos para medir este factor de potencia, los -- cuales difieren en el tipo de aparatos empleados. La medición de el factor de potencia puede hacerse en forma directa, en forma indirecta o bien, tomando un valor instantáneo o un valor promedio.

Generalmente podemos utilizar cuatro métodos:

- 1) Por medio de un WATTMETRO, un VOLTIMETRO y un AMPERMETRO.
- 2) Método de los dos WATTMETROS.
- 3) Método del WATHHORIMETRO y del VARHORIMETRO
- 4) Por medio del indicador del f.p. (instantáneo).

1. METODO DEL WATTMETRO, VOLTIMETRO y AMPERMETRO.

Antes de explicar el método se tratará brevemente sobre el funcionamiento del WATTMETRO.

El Wattmetro está formado básicamente por una bobina fija de poca resistencia (bobina de corriente) y una bobina móvil (bobina de - voltaje) de alta resistencia .

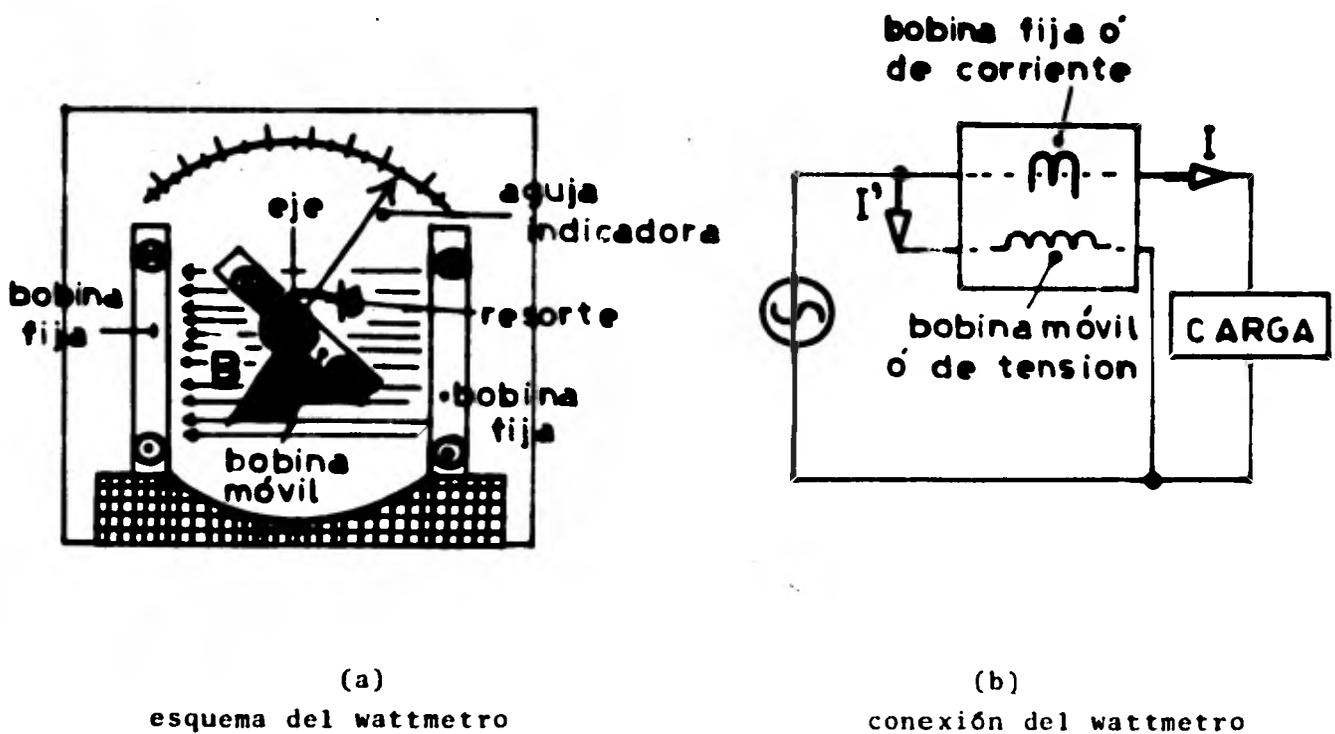


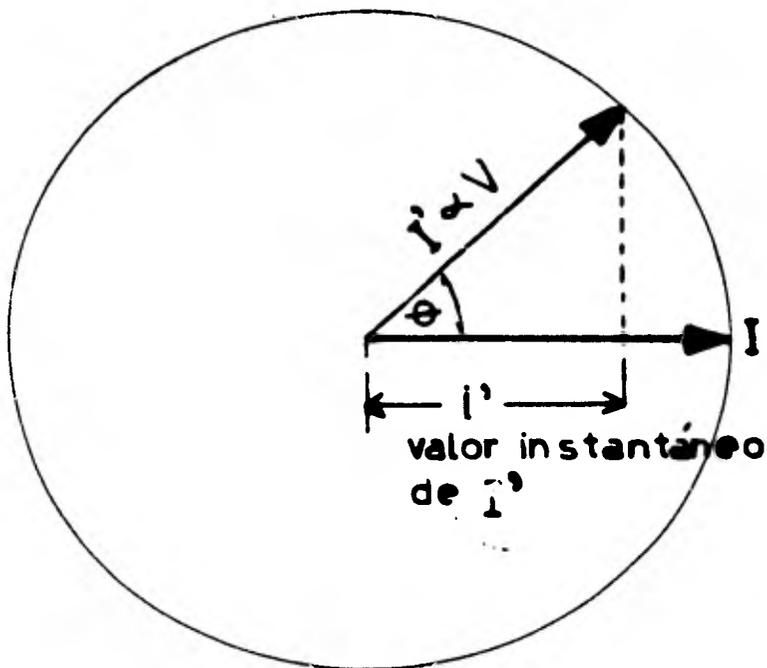
FIG. (3.1)

La bobina fija o de corriente se conecta en serie con la línea y la bobina móvil ó de tensión se conecta en paralelo.

El par (T) que se ejerce sobre la bobina móvil esta dado por la siguiente expresión:

$$T = k i i'; \quad k = \text{cte. de proporcionalidad}$$

donde: i e i' = son valores instantáneos de I e I' en la fig. (3.1b).



$$I' \propto V$$

$$\text{o sea } I' = KV$$

FIG. (3.2)

el par medio $T_{\text{medio}} = K I V \cos \theta$

en el muelle el par es $T = k \phi$

donde: $\phi =$ es el ángulo girado. Así: $\phi = K I V \cos \theta$.

Para medir el factor de potencia, usando un wattmetro, un voltimetro y un ampermetro, se conectan los dispositivos de la siguiente manera:

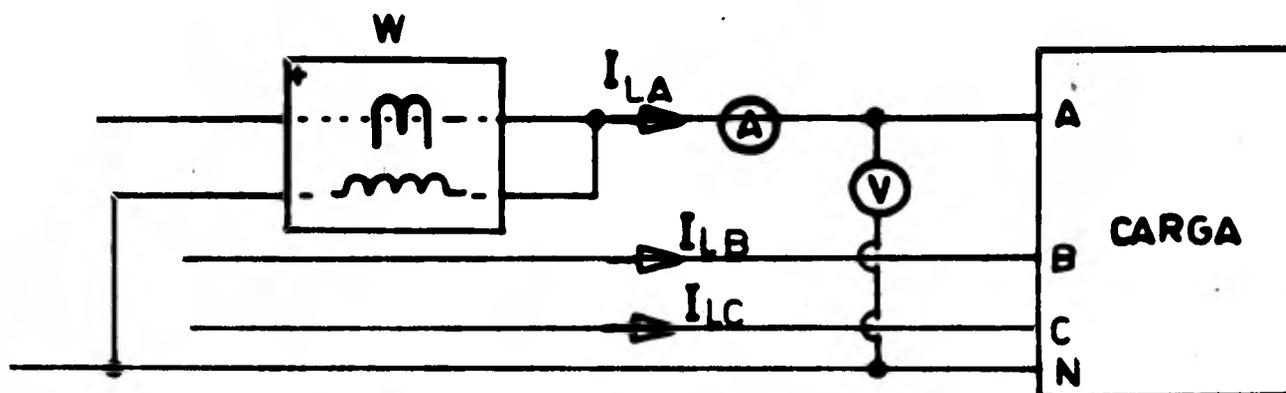


FIG. (3.3)

De aquí podemos obtener el factor de potencia mediante la expresión:

$$\text{f.p.} = \frac{\text{Potencia Activa}}{\text{Potencia Aparente}} \rightarrow \begin{array}{l} \text{lectura del wattmetro} \\ \text{producto de las lecturas} \\ \text{del voltmetro y ampermetro.} \end{array}$$

o sea
$$\text{f.p.} = \frac{W}{V \cdot A}$$

Para el caso en que el sistema sea balanceado el factor de potencia será el mismo en cada una de las tres fases.

2) METODO DE LOS DOS WATTMETROS

Este metodo, además de darnos el factor de potencia de un sistema trifásico balanceado de 3 hilos, nos da la potencia total suministrada al circuito.

En la figura (3.4) se muestran las conexiones para realizar las mediciones.

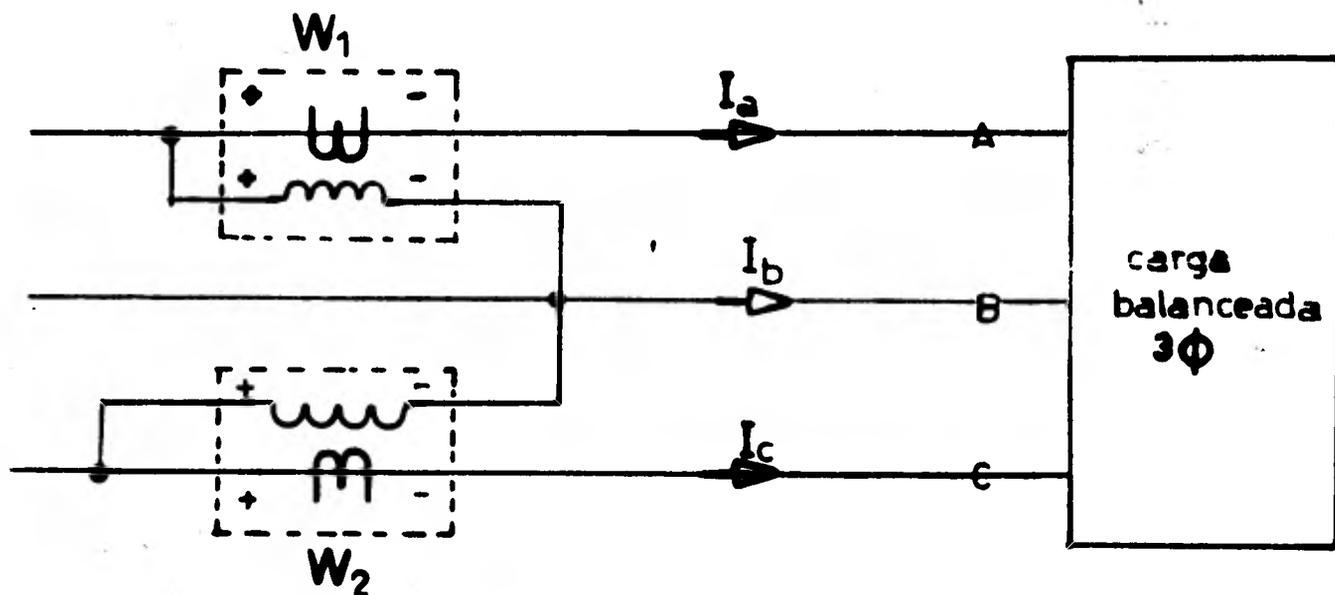


FIG. (3.4)

Las bobinas de corriente de los dos wattmetros se conectan en serie con dos de los cables de conexión de las líneas, mientras que la bobina de potencial de cada wattmetro se conecta entre el cable de la línea al que está conectada su bobina de corriente y el tercer cable de la línea.

Para obtener la lectura de cada uno de los Wattmetros vamos a vernos del diagrama fasorial representativo de la corriente y voltaje en cada una de las fases:

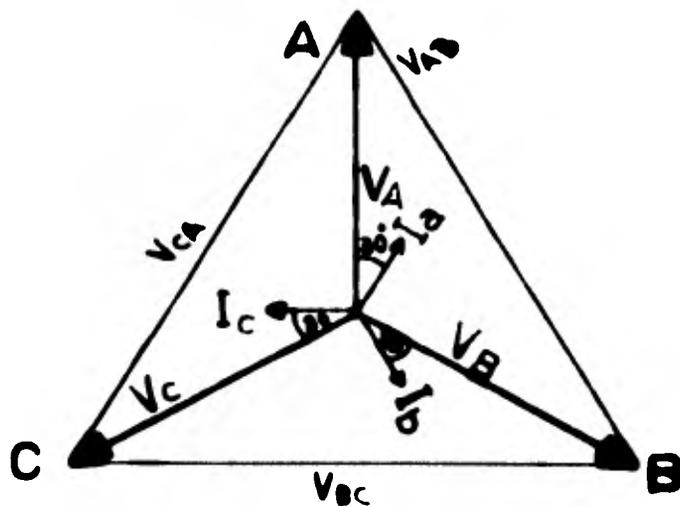


FIG. (3.5)

Análiticamente tenemos:

$$W_1 = V_{AB} I_a \cos (\theta + 30^\circ)$$

$$W_1 = \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta - \frac{1}{2} \operatorname{sen} \theta \right] V_{AB} I_a \quad (3.1)$$

$$W_2 = V_{CB} I_c \cos (30^\circ - \theta)$$

$$W_2 = \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta + \frac{1}{2} \operatorname{sen} \theta \right] V_{CB} I_c \quad (3.2)$$

haciendo: $\frac{E_c (3.1)}{E_c (3.2)} \dots \frac{W_1}{W_2} = K$

se tiene:
$$K = \frac{V_{AB} I_a}{V_{CB} I_c} \frac{\left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta - \frac{1}{2} \operatorname{sen} \theta \right]}{\left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta + \frac{1}{2} \operatorname{sen} \theta \right]}$$

$$K = \frac{\sqrt{3} \cos \theta - \operatorname{sen} \theta}{\sqrt{3} \cos \theta + \operatorname{sen} \theta} \rightarrow \begin{array}{l} \text{lectura menor} \\ \text{lectura mayor} \end{array}$$

de esta expresión se sigue que:

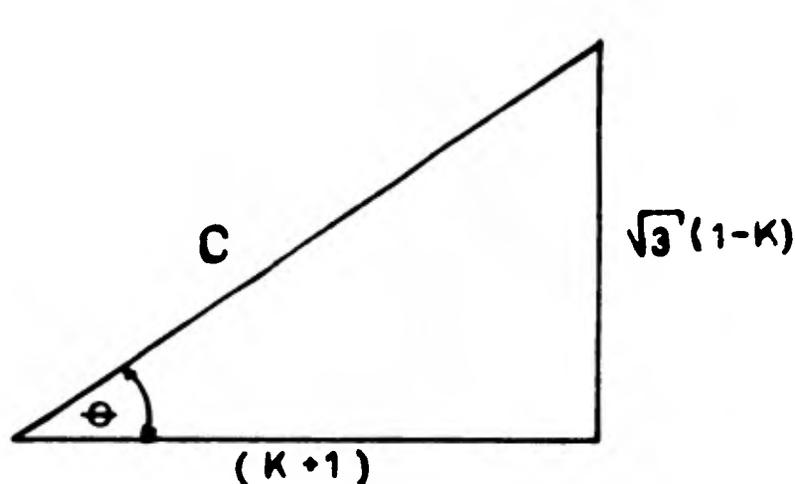
$$K \left[\sqrt{3} \cos \theta + \operatorname{sen} \theta \right] + \operatorname{sen} \theta = \sqrt{3} \cos \theta$$

o sea $K \sqrt{3} \cos \theta + K \operatorname{sen} \theta + \operatorname{sen} \theta = \sqrt{3} \cos \theta$

asi: $\sqrt{3} \cos \theta [1 - K] = \operatorname{sen} \theta [1 + K]$

haciendo: $\frac{\operatorname{sen} \theta}{\cos \theta} = \frac{\sqrt{3} [1 - K]}{1 + K}$

Esta función trigonométrica al graficarla en un triángulo rectángulo, queda como se muestra en la figura (3.6)



$$\frac{\text{sen } \theta}{\text{cos } \theta} = \frac{\sqrt{3}(1-k)}{1+k}$$

FIG. (3.6)

De modo que de la figura se obtiene:

$$C = \sqrt{[\sqrt{3}(1-K)]^2 + (K+1)^2}$$

o sea:

$$C = \sqrt{4 - 4K + 4K^2} = 2 \sqrt{1-k+k^2}$$

o bien:

$$\text{f.p.} = \text{cos } \theta = \frac{K+1}{2 \sqrt{1-k+k^2}}$$

donde: $K = \frac{\text{lectura menor}}{\text{lectura mayor}}$

esta expresión se puede graficar como se muestra en la figura (3.7).

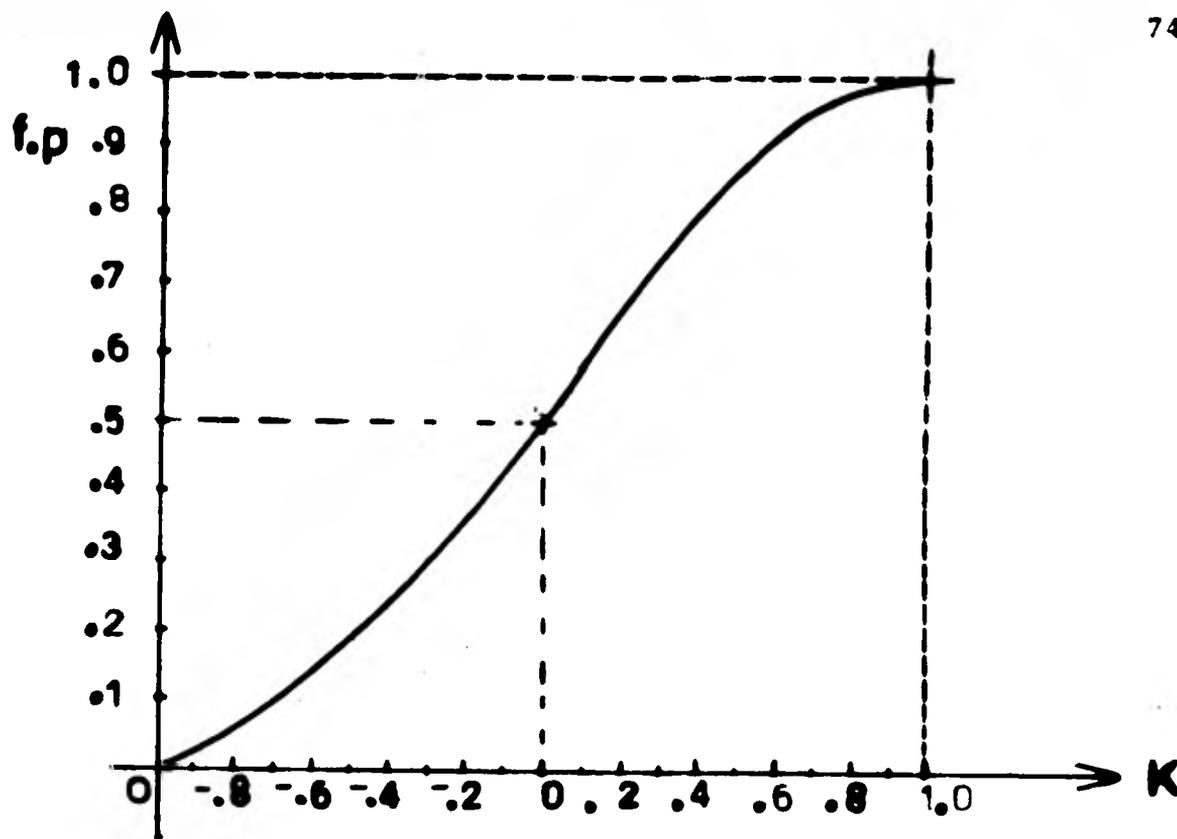


FIG. (3.7)

Además la suma de $W_1 + W_2$ nos da la potencia real total que consume el circuito.

3. METODO DEL WATTHORIMETRO Y DEL VARHORIMETRO.

MEDICION DE LA ENERGIA ACTIVA

Para medir la energía activa que se consume en un circuito de corriente alterna se utilizan wathhorímetros de inducción de campo-desplazable. (uno de ellos se muestra en la figura 3.8).

El sistema se caracteriza por el uso de bobinas fijas que se alimentan con corriente alterna, creando un campo magnético desplazable que induce corrientes parásitas en un disco de aluminio, el cual representa la parte móvil del instrumento. Las corrientes parásitas interactuando con el flujo magnético creado por las bobinas, produce fuerzas resultantes bajo cuyo efecto el disco girará.

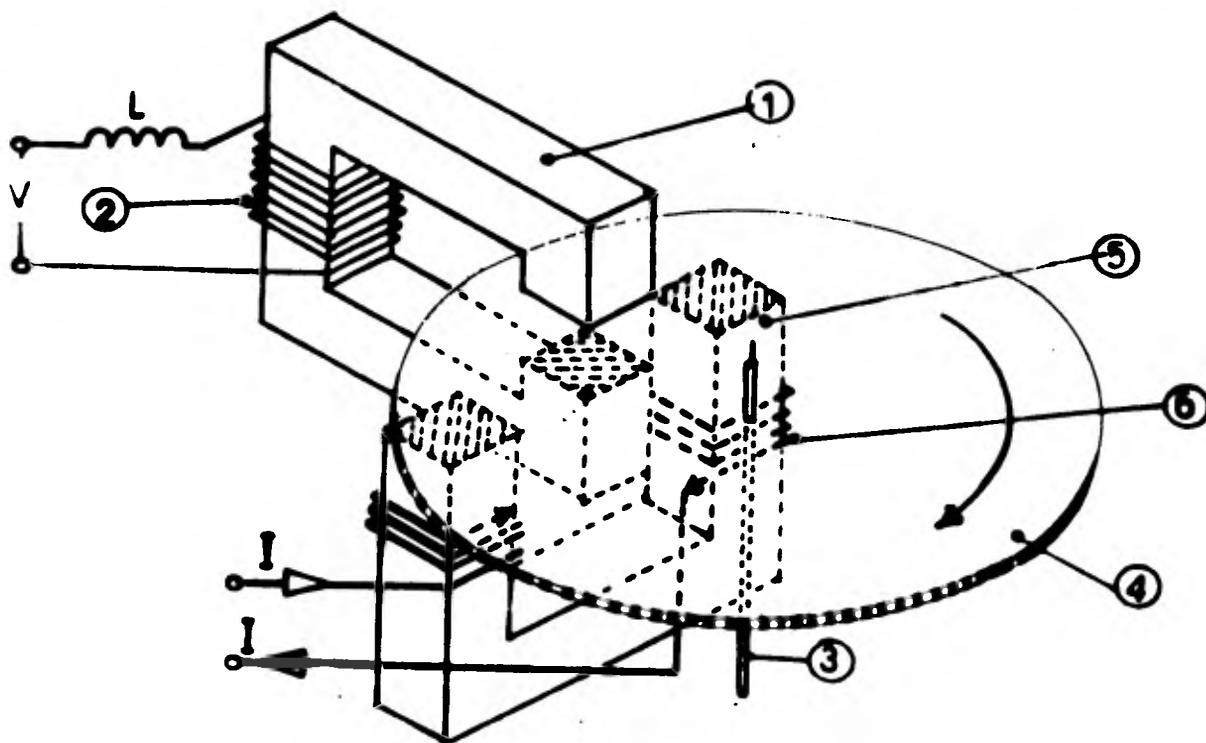


FIG. (3.8) **WATT HOUR METRO**

Respecto de la figura (3.8) en el conductor ferromagnético (1) - se dispone la bobina (2) que consta de un gran número de espiras de alambre fino que a su vez esta conectada en paralelo a la red monofásica. El flujo magnético que crea esta bobina, atraviesa el disco de aluminio (4) montado sobre el eje (3). Bajo el disco se coloca el imán permanente (5) sobre el cual va montado el devanado de alambre grueso; este devanado se conecta en serie -- con el circuito cargado a la red monofásica.

El flujo magnético creado por este electroimán atraviesa dos veces el disco de aluminio. La inductancia (L) colocada en serie con la bobina (2) sirve para producir un retardo en fase del flujo magnético creado por esta última, con respecto al flujo creado por la bobina (6).

De ésta manera dos flujos magnéticos que están en defasaje, uno respecto al otro, inducen en el disco de aluminio corrientes parásitas, las cuales, interactuando con los flujos, crean un par de arranque; bajo la influencia de este par de arranque el disco

se pone en movimiento.

En la figura 3.9 se muestra el esquema de la conexión de un watt horímetro a la red monofásica.

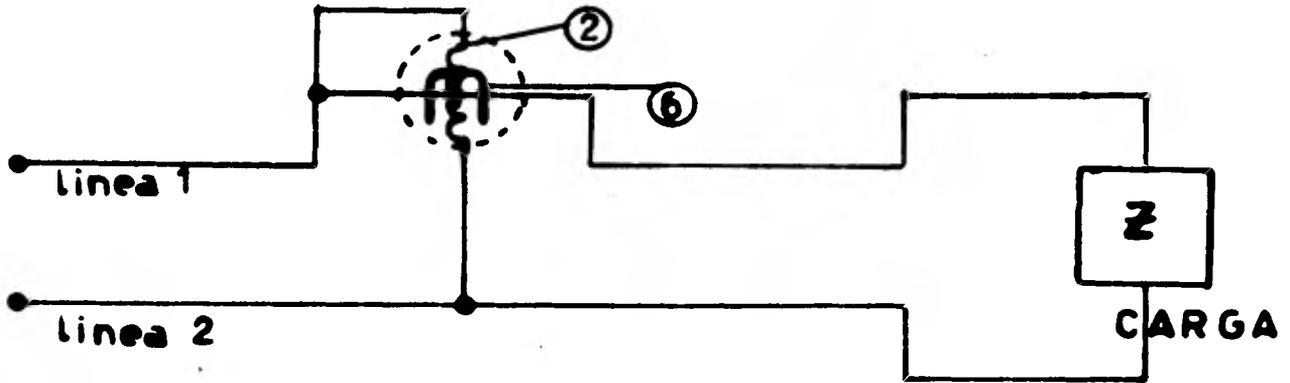


FIG. (3.9) CONEXION DE UN WATTHORIMETRO A UNA RED MONOFASICA

La energía activa de una red trifásica se puede medir utilizando dos medidores monofásicos, conectando sus terminales a la red trifásica según el esquema mostrado a continuación:

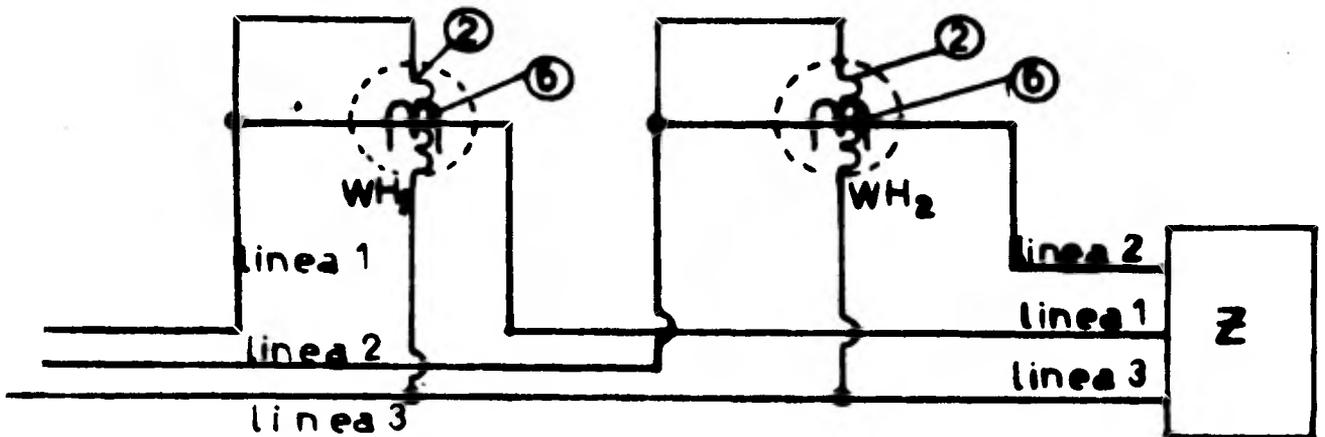


FIG. (3.10) CONEXION DE 2 MEDIDORES (WATTHORIMETROS) A UNA RED TRIFASICA.

La energía consumida en la red trifásica (3ϕ) será la suma de las

lecturas obtenidas por los dos medidores.

Cada una de las lecturas es proporcional al número de revoluciones realizadas por el disco de aluminio y, por medio de una transmisión dentada, la rotación del eje se comunica al mecanismo contador de KWH.

Este tipo de medidores es muy sensible a sobrecargas por lo que, para medir la energía en redes de alta tensión, se utilizan transformadores de medición que reducen el voltaje a 115 ó 125 volts, y los valores de corriente se reducen a un rango de valores cercanos a cinco amperes.

MEDICION DE LA ENERGIA REACTIVA

La energía reactiva de la corriente monofásica se puede conocer por las indicaciones de un ampérmetro, un voltmetro, un indicador del factor de potencia y un cronómetro.

Conociendo el $\cos \theta$ se puede obtener la función seno del mismo ángulo ($\sin \theta$) y se reemplaza en la expresión:

$$\text{VARH} = VI t \sin \theta$$

donde: t = es el tiempo transcurrido en horas durante la medición.

Existen contadores de energía reactiva monofásica que generalmente se usan en los sistemas eléctricos de distribución a baja tensión y algunas veces en sistemas a alta tensión.

Para medir la energía reactiva en las redes de corriente trifásica, se pueden emplear, si la carga es balanceada, medidores de energía activa monofásicos según el esquema mostrado en la figura (3.11).

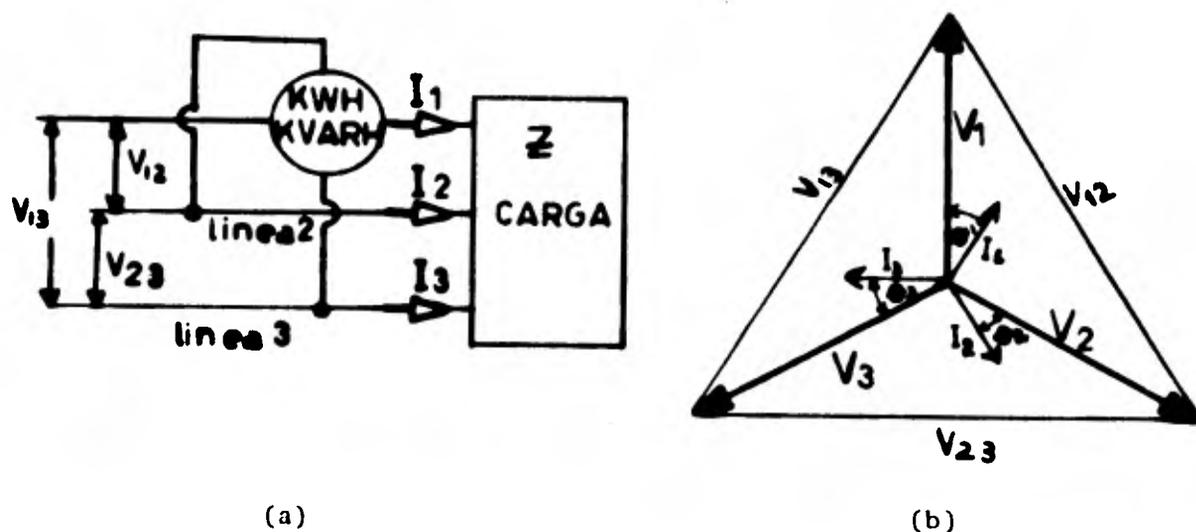


FIG. (3.11)

Por el devanado en serie del contador pasa la corriente de la primera fase I_1 y el devanado en paralelo del mismo está conectado a la tensión lineal V_{23} que, según el diagrama vectorial, está-defasada 90° con relación a la tensión monofásica V_1 ; como la-tensión V_{23} es $\sqrt{3}$ veces mayor que V_1 entonces:

$$\text{KVAR H} = V_{23} I t \cos (90^\circ - \theta_1)$$

o sea
$$\text{KVAR H} = \sqrt{3} V_1 I_1 t \sin \theta_1$$

de aquí que la energía reactiva que este contador registrará en una fase estará aumentada en $\sqrt{3}$ veces mayor que la real, por lo que habrá que dividir cada lectura de los medidores por $\sqrt{3}$.

La compañía que suministra energía eléctrica instala, en el punto de entrega, wathhorímetros y varhorímetros para medir la energía-suministrada durante un cierto intervalo de tiempo. En nuestro país la CIA. DE LUZ Y FUERZA utiliza tres maneras diferentes para

medir la energía suministrada a sus consumidores. Estas varían de acuerdo a la clase de servicio en una fase ó a tres fases, ó si es en alta ó baja tensión. Estas formas de medición son:

- i) medición directa
- ii) medición indirecta
- iii) medición semiindirecta

MEDICION DIRECTA

Se aplica a consumidores domésticos, al pequeño comercio y a consumidores de consumo menor a 50 amperes. Normalmente son consumidores con servicio monofásico a dos hilos y la medición de la energía que consumen se realiza por medio de un solo WATTHORIMETRO monofásico.

MEDICION SEMINDIRECTA

Se aplica a consumidores, con una carga considerable y cuyo servicio es en baja tensión y tres fases con cuatro hilos. La medición tiene lugar en baja tensión instalando un wathorimetro y un varhorimetro monofásicos por cada fase de la acometida. Además, debido a las altas corrientes que demanda este tipo de consumidor, se instalan transformadores de corriente entre la línea y los medidores de energía de modo que estos medidores trabajen con corrientes no mayores de 5 Amperes.

MEDICION INDIRECTA

Se aplica solo a servicio en alta tensión, es decir, a consumidores con servicio primero a una subestación eléctrica, propiedad de estos, a través de una acometida de 13.2 KV, 23 KV ó también 83 KV de línea; es el caso de las medianas y grandes industrias que cuentan con una gran capacidad instalada. En este caso la medición se puede hacer en el lado de alta ó en el lado de baja tensión en la subestación mencionada. En ambos casos se instalan transformadores de medición (de potencialy/o de co-

riente) entre la línea y los medidores que pueden ser monofásicos o trifásicos; si son monofásicos se instalan tres watthorímetros, tres varhorímetros y un medidor trifásico de demanda máxima de potencia activa.

Si son trifásicos se instalan un watthorímetro trifásico, un varhorímetro trifásico y un medidor de máxima demanda de potencia.

Para medir el factor de potencia promedio que mantuvo la carga durante un período de tiempo en el que se midió la energía (por ejemplo un mes) la compañía suministradora utiliza las lecturas de estos mismos medidores y las aplica en la siguiente expresión:

$$\cos \theta_{\text{prom.}} = \frac{(KWH)_{\text{mes}}}{\sqrt{(KWH)_{\text{mes}}^2 + (KVARH)_{\text{mes}}^2}} \quad (3.3)$$

donde:

$\cos \theta_{\text{prom.}}$ = el factor de potencia promedio en un mes.

$(KWH)_{\text{mes}}$ = energía activa consumida en un mes.

$(KVARH)_{\text{mes}}$ = energía reactiva consumida en un mes.

Los valores mencionados se tomaron para un mes, pero el intervalo de tiempo durante el cual se toman las lecturas puede variar.

Asimismo se pueden obtener otras formas de obtener el factor de potencia, por ejemplo:

$$\text{con la expresión } \tan \theta_{\text{prom}} = \frac{(KWH)_{\text{mes}}}{(KVARH)_{\text{mes}}} \quad (3.4)$$

y las relaciones trigonométricas correspondientes, se puede obtener el $\cos \theta_{\text{prom.}}$

Cuando la carga alimentada no esta sujeta a grandes variaciones en las distintas épocas del año; se puede usar la expresión anterior (3.4) para calcular el factor de potencia promedio (mensual ó bimestral). Las cantidades (KWH) y $(KVARH)$ suelen venir especificadas en los recibos de la compañía eléctrica. También al-

gunas veces dichos recibos marcan directamente el factor de potencia promedio.

4. METODO DIRECTO UTILIZANDO UN INDICADOR DEL FACTOR DE POTENCIA.

El factor de potencia se puede medir en una red trifásica o monofásica, en forma directa e instantánea a través de un indicador del factor de potencia trifásico ó monofásico, según el caso. En la figura (2.5) se muestra en el esquema un indicador monofásico del factor de potencia.

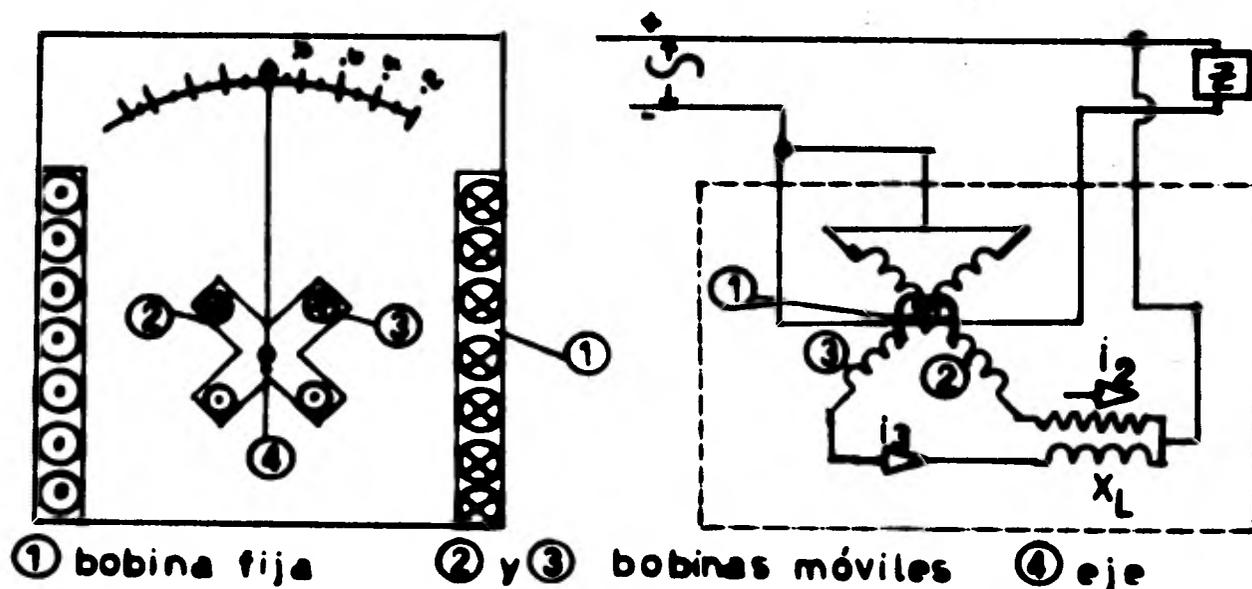


FIGURA (3.12)

El instrumento consta de una bobina fija (1), conectada en serie con la red, y de dos bobinas móviles (2 y 3) asentadas sobre un eje (4) y dispuestas bajo un ángulo de 90° entre sí. Los devanados de estas bobinas tienen un gran número de espiras de alambre fino y están conectadas en paralelo a la red. La bobina (2) está conectada en serie con la resistencia activa (r) y la corriente I_2 de la misma coincide en fase con la tensión de la red v .

La bobina (3) está conectada en serie con la reactancia inducti-

va X_L y su intensidad de corriente I_3 , esta defasada 90° en retardo con respecto a la tensión de la red.

El par que desarrolla la bobina (2) es proporcional a la potencia activa de la red. El par desarrollado por la bobina (3) es proporcional a la potencia reactiva de la red. Así las bobinas están conectadas de modo que sus pares son opuestos.

La posición de la parte móvil del indicador de factor de potencia, que se determina por el ángulo de viraje de las bobinas 2 y 3, depende del defasamiento θ entre la tensión y la corriente.

Debido a esto la escala del instrumento se puede graduar directamente en valores del factor de potencia ($\cos \theta$). El instrumento dispone de una escala bilateral, la parte derecha de la escala da el valor de el factor de potencia en caso de tener una carga inductiva y la parte izquierda en caso de una carga capacitiva.

CAPITULO IV

ANALISIS TECNICO ECONOMICO DE LOS METODOS DE CORRECCION DEL BAJO FACTOR DE POTENCIA

Uno de los medios a nuestro alcance para juzgar el grado de eficiencia con el que se esta utilizando la energia eléctrica es el factor de potencia; esto es debido a las repercusiones técnicas y económicas (vistas en el capítulo II) que éste tiene en las instalaciones eléctricas.

Por lo tanto un control en el factor de potencia se traducira en un aumento de la eficiencia con que utiliza la energia eléctrica, a la vez con esto controlamos uno de los factores que afectan a los costos de producción.

Basicamente existen dos dispositivos para corregir el bajo factor de potencia en instalaciones eléctricas.

Uno de ellos se forma por bancos de capacitores estáticos, el otro es el motor síncrono. El motor síncrono, cuando es utilizado solo para la corrección del factor de potencia, recibe el nombre de "capacitor síncrono".

En este capítulo se analizan diversas alternativas para el cálculo e instalación de capacitores estáticos y se darán las bases teóricas para la utilización del motor síncrono.

1. CAPACITOR ESTATICO.- CARACTERISTICAS GENERALES.

La capacitancia se forma cuando dos conductores, separados por un dieléctrico, se conectan a una fuente de potencial.

Un capacitor es un dispositivo formado básicamente por dos placas conductoras separadas por un dieléctrico y tiene la característica de que una de las placas almacena cargas de un signo y en la otra almacena igual cantidad de carga, pero de signo contrario.

Se define la capacidad de un capacitor, como la relación de la carga de cualquiera de las placas conductoras a la diferencia de potencial entre ellas.

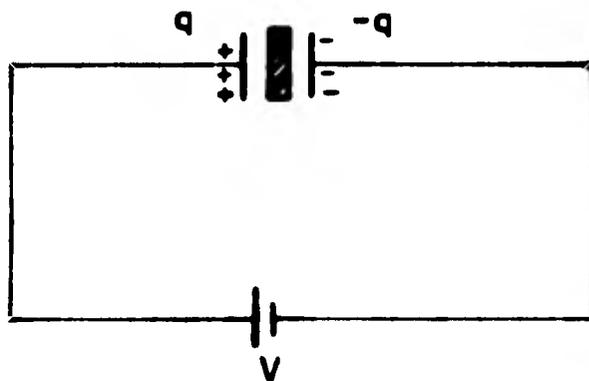


FIG. (4.1)

donde: $c = \frac{q}{v}$ → capacidad

q = carga en coulombs

v = diferencia de potencial en volts.

La unidad de capacitancia es el farad y la posee un capacitor -- cuando se le comunica a cada una de sus placas, una carga de un-coulombs y existe una diferencia de potencial de un volt.

El farad es una unidad muy grande, por lo que se emplean en la práctica algunos submúltiplos, como:

1 microfarad (μf) = 10^6 farad

1 picofarad (pf) = 10^{12} farad

El tipo de condensador ó capacitor mas frecuentemente usado es el de placas paralelas; éste comprende dos láminas paralelas separadas entre si una distancia que es muy pequeña comparada con las dimensiones lineales de las láminas. Este pequeño espacio es ocupado por el dieléctrico.

La capacitancia de un condensador crece si se aumenta la superficie A de las láminas, si se disminuye la distancia entre sus pla

cas, si se aumenta la capacidad especifica de inducción ϵ del dieléctrico.

Asi la capacitancia puede ser expresada de la siguiente forma:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (4.1)$$

donde: ϵ = es la capacidad especifica de inducción del dieléctrico.

A = es la superficie de la lámina en $[m^2]$

d = es la distancia entre las láminas en $[m]$

A continuación se citan algunas constantes dieléctricas correspondientes a los dieléctricos más comunes en algunos tipos de capacitores.

DIELECTRICO	COSTANTE ϵ
vacio	1
aire	1.006
papel	2
aceite mineral	2.3
papel impregnado en diacoloro	5
fibras de celulosa	6

El uso del capacitor de potencia se inició en el año de 1914. Durante los primeros años se fabricó con dieléctricos de papel impregnado en aceite mineral. En 1932, con la utilización de los ascareles (hidro carburos aromáticos clorados) como impregnantes, se produjo una verdadera revolución en la técnica de los capacitores de potencia. Bajaron las dimensiones, pesos, y por ende el costo de las unidades lograndose, además, un gran avance en la seguridad de su uso debido al hecho de ser incombustible dicho impregnante.

Esto permitió fabricar unidades hasta de 15 KVAR de capacidad que, al paso del tiempo, han venido aumentando hasta alcanzar en 1959 unidades de 100 KVAR.

La introducción reciente de dieléctricos de plástico combinados con papel kraff, e impregnados con askarel, ha permitido fabricar unidades de 150 y 300 KVAR mas compactos y con menores perdidas en el dieléctrico.

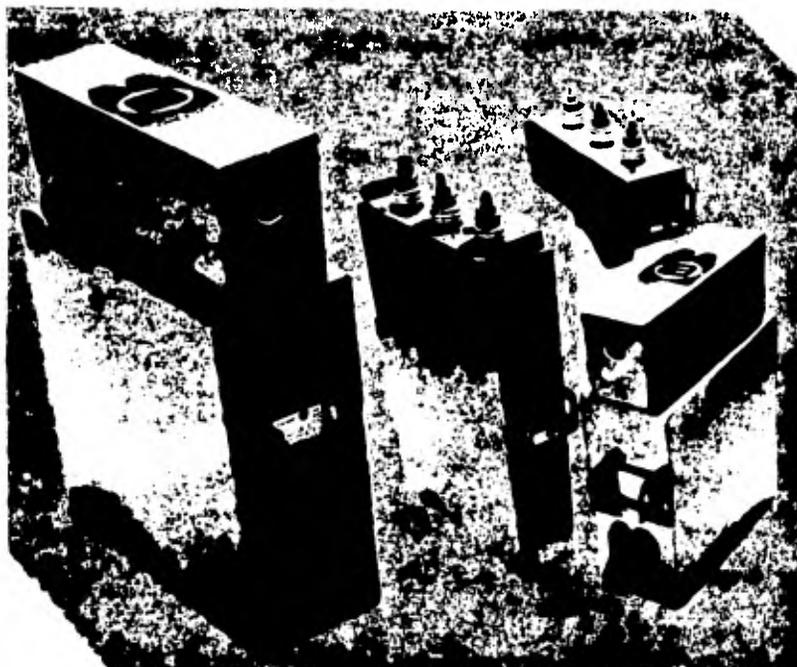


FIG. (4.2)

En los capacitores de potencia, que se fabrican en la actualidad, las placas están constituidas por hojas de papel aluminio y su dieléctrico consiste de varias capas de papel combinadas con capa de materiales plásticos impregnados con un liquido aislante.- Para su fabricación, las hojas de aluminio y el material aislante se arrollan y después se comprimen para darles una forma rectangular aproximada; posteriormente se someten a un tratamiento de secado al vacio y colocándose dentro de un recipiente metálico hermético, el cual se llena con un liquido aislante para que se lleve a cabo la impregnación del dieléctrico.

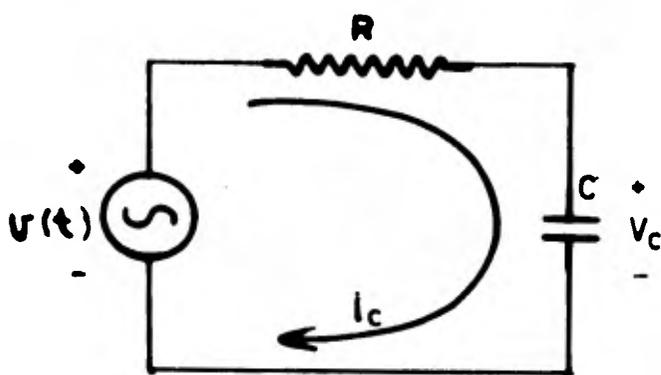
Una vez realizado lo anterior el capacitor se somete a las prue-

bas de rutina para verificar: rigidez dieléctrica, la capacitancia, temperaturas de operación, etc. Estando todas ellas de acuerdo a las normas de fabricación de capacitores expedidas -- por el comité consultivo nacional de normalización de la industria eléctrica "CCONNIE".

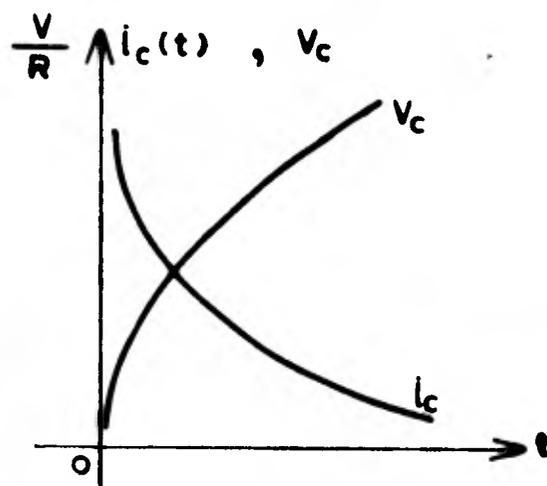
1a. COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE EN UN CAPACITOR

Cuando se conecta un capacitor descargado, a una fuente de potencial, la corriente a través del circuito está dada por la expresión:

$$i_c(t) = \frac{V_{ab}}{R} e^{-t/RC}$$



(a)



(b)

FIG. (4.3) COMPORTAMIENTO DEL CAPACITOR

El voltaje está dado por la expresión:

$$V_c = V (1 - e^{-t/RC})$$

Se puede observar que, en el instante de la conexión, (instantáneamente) el capacitor se comporta como si se tratará de un cor-

to circuito.

La corriente quedará limitado solo por la resistencia R de los conductores de conexión (en ohms). La corriente de descarga seguirá la misma ley de variación; así el voltaje del capacitor y la corriente del mismo quedan relacionados por la expresión:

$$i_c = C \frac{d V_C}{dt} \quad (4.2)$$

En corriente alterna el voltaje y la corriente están 90° defasados.

1b. ENERGIA DE UN CONDENSADOR

Un capacitor, debido a la propiedad que tiene de mantener un campo eléctrico entre sus placas, es capaz de almacenar una cierta cantidad de energía; esta energía esta dada por la ecuación:

$$E = \frac{1}{2} C V_C^2 \quad (4.3)$$

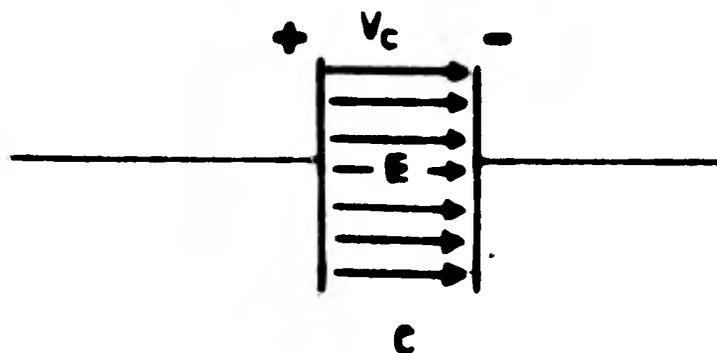


FIG. (4.4) CAMPO ELECTRICO EN EL CAPACITOR

En corriente alterna esta energía (E) es llamada POTENCIA REACTIVA CAPACITIVA (Q_C). Si se considera a $V_C \text{ max}$ la energía -- que se almacena será:

$$Q_c = C V_c^2 \max$$

tomando el valor eficaz de la tensión de la red (V) a las que se conecta:

$$Q_c = \frac{C V^2}{2} \tag{4.3}$$

Es de ésta energía de lo que nos valdremos para corregir el bajo factor de potencia, ya que la demanda de éste tipo de energía es lo que provoca el bajo factor de potencia.

Los capacitores nos proporcionan éste tipo de potencia y así se soluciona el problema.

En realidad los capacitores no la suministran, solo la reciben-- inicialmente de la fuente y posteriormente, esta energía oscila entre la inductancia y la capacitancia.

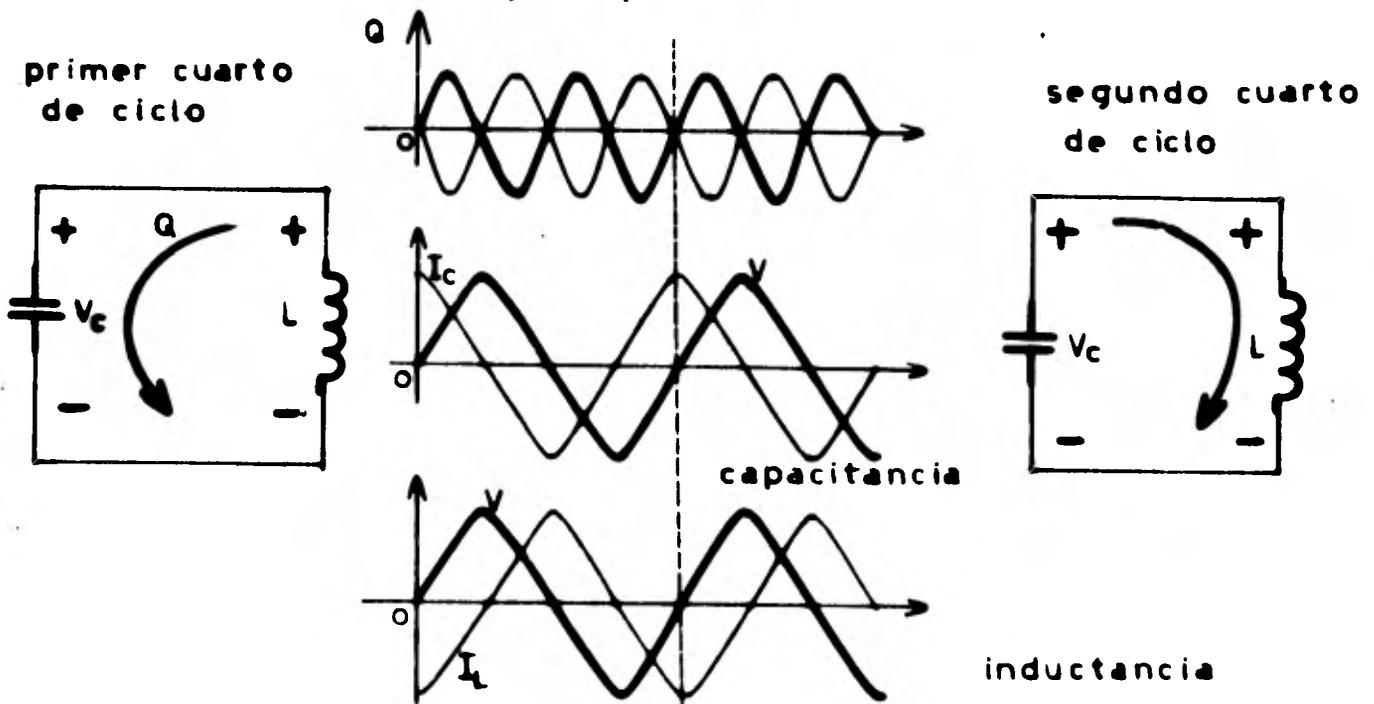


FIG. (4.5) FLUJOS DE ENERGIA

2. CALCULO DE LA POTENCIA REACTIVA CAPACITIVA NECESARIA PARA MEJORAR EL FACTOR DE POTENCIA EN LAS INSTALACIONES INDUSTRIALES.

La corrección de un bajo factor de potencia no es de ninguna manera un asunto que deben considerar únicamente las grandes industrias con gran número de equipos eléctricos; las dimensiones en que se producen los capacitores de potencia y la facilidad y economía, con que pueden instalarse, permiten esta solución al problema del costo de la energía eléctrica en instalaciones de cualquier orden.

En la figura siguiente se muestra un diagrama vectorial con los nombres de las potencias que intervienen en una instalación eléctrica industrial.

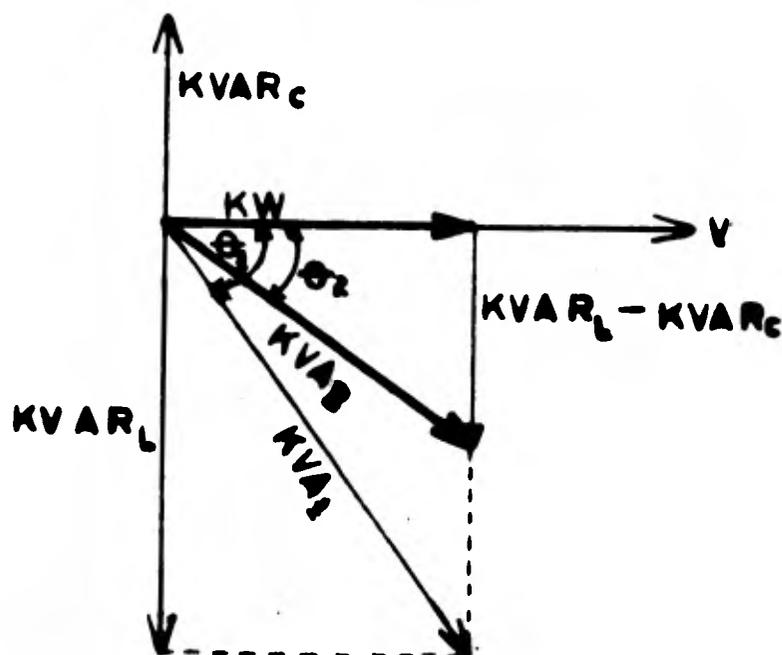


FIG. (4.6)

De la figura:

$$\begin{aligned} \cos \theta_1 &= \text{f.p. inicial} \\ \cos \theta_2 &= \text{f.p. corregido} \end{aligned}$$

- KW** = potencia efectiva ó activa demandada, medida en kilowatts.
- KVA** = potencia aparente demandada inicialmente, medida en kilovoltamper.
- KVAR** = potencia reactiva inductiva, demandada por la carga en kilovolt-amperes.
- KVAR_c** = potencia reactiva capacitiva en kilovolt-amperes necesaria para corregir el f.p. de $\cos \theta_1$ a $\cos \theta_2$.

Del diagrama se obtienen las siguientes relaciones:

$$KW = KVA \cos \theta_1 \quad (4.4)$$

$$KVA = \sqrt{(KW)^2 + (KVAR)^2} \quad (4.5)$$

y

$$KVAR_c = KW (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (4.6)$$

Por medio de aparatos de medición podemos conocer las magnitudes de KW, KVAR, KVA, en una forma instantánea o bien los valores de KWH y KVARH consumidos durante un período de tiempo determinado.

Según las condiciones de operación de un sistema se puede obtener su factor de potencia de la siguiente manera:

$$\text{f.p. inst.} = \cos \theta \text{ ó sea; f.p. inst.} = \frac{KW}{KVA} \quad (4.7)$$

o también:

$$\text{f.p. prom.} = \frac{KWH}{\sqrt{(KWH)^2 + (KVAR)^2}} \quad (4.8)$$

El uso de las expresiones (4.7) ó (4.8) depende de las fluctuaciones que sufra la carga durante el período ó momento que se está considerando.

Para obtener la potencia reactiva capacitiva necesaria para elevar el f.p. a otro valor predeterminado, se utiliza la expresión

(4.5) o sea

$$KVAR_c = KW (\tan \phi_1 - \tan \phi_2)$$

para lo que: $\tan \phi_1 = \frac{\sqrt{1 - (f.p._1)^2}}{f.p._1}$ (4.9)

y $\tan \phi_2 = \frac{\sqrt{1 - (f.p._2)^2}}{f.p._2}$

Para facilitar el cálculo, en la tabla (4.A) se obtiene directamente el valor del factor $(\tan \phi_1 - \tan \phi_2)$ de la expresión -- (4.6) a partir de los parámetros f.p.₁ y f.p.₂.

Factor de Potencia Original	Factor de Potencia Demandado					Factor de Potencia Original	Factor de Potencia Demandado				
	80%	85%	90%	95%	100%		80%	85%	90%	95%	100%
81%	2.317	2.447	2.582	2.738	3.067	66%	0.388	0.318	0.654	0.809	1.130
82	2.211	2.341	2.476	2.632	2.961	67	0.358	0.488	0.623	0.779	1.108
83	2.111	2.241	2.376	2.532	2.861	68	0.328	0.458	0.593	0.749	1.078
84	2.016	2.146	2.281	2.437	2.766	69	0.299	0.429	0.564	0.720	1.049
85	1.926	2.056	2.191	2.347	2.676	70	0.270	0.400	0.535	0.691	1.020
86	1.841	1.971	2.107	2.262	2.591	71	0.241	0.372	0.507	0.663	0.991
87	1.761	1.891	2.026	2.182	2.511	72	0.213	0.344	0.479	0.633	0.963
88	1.684	1.814	1.949	2.105	2.434	73	0.186	0.316	0.451	0.607	0.934
89	1.611	1.741	1.876	2.032	2.361	74	0.158	0.289	0.424	0.580	0.908
90	1.541	1.671	1.807	1.962	2.291	75	0.131	0.262	0.397	0.553	0.881
91	1.474	1.604	1.740	1.895	2.224	76	0.105	0.235	0.370	0.526	0.855
92	1.410	1.541	1.676	1.832	2.160	77	0.078	0.208	0.344	0.499	0.828
93	1.349	1.479	1.615	1.770	2.099	78	0.052	0.182	0.318	0.473	0.802
94	1.291	1.421	1.556	1.712	2.041	79	0.026	0.156	0.291	0.447	0.776
95	1.234	1.364	1.500	1.655	1.984	80	.....	0.130	0.265	0.421	0.750
96	1.180	1.310	1.446	1.601	1.930	81	.....	0.104	0.239	0.395	0.724
97	1.128	1.258	1.393	1.549	1.878	82	.....	0.078	0.213	0.369	0.698
98	1.077	1.207	1.343	1.498	1.827	83	.....	0.052	0.187	0.343	0.672
99	1.029	1.159	1.294	1.450	1.779	84	.....	0.026	0.161	0.317	0.645
100	0.982	1.112	1.247	1.403	1.732	85	.....	.....	0.135	0.291	0.619
81	0.934	1.064	1.202	1.357	1.684	86	.....	.....	0.109	0.264	0.593
82	0.892	1.023	1.158	1.314	1.642	87	.....	.....	0.082	0.238	0.566
83	0.850	0.980	1.115	1.271	1.600	88	.....	.....	0.055	0.211	0.539
84	0.808	0.939	1.074	1.230	1.558	89	.....	.....	0.028	0.183	0.512
85	0.768	0.898	1.034	1.189	1.518	90	.....	.....	.....	0.155	0.484
86	0.729	0.859	0.995	1.150	1.479	91	.....	.....	.....	0.126	0.455
87	0.691	0.821	0.957	1.112	1.441	92	.....	.....	.....	0.097	0.426
88	0.654	0.784	0.920	1.075	1.404	93	.....	.....	.....	0.066	0.395
89	0.618	0.748	0.884	1.039	1.368	94	.....	.....	.....	0.034	0.362
90	0.583	0.713	0.849	1.004	1.333	95	.....	.....	.....	.....	0.328
91	0.549	0.679	0.814	0.970	1.299	96	.....	.....	.....	.....	0.291
92	0.515	0.645	0.781	0.936	1.265	97	.....	.....	.....	.....	0.250
93	0.482	0.613	0.748	0.904	1.232	98	.....	.....	.....	.....	0.203
94	0.450	0.580	0.716	0.871	1.200	99	.....	.....	.....	.....	0.147
95	0.419	0.549	0.684	0.840	1.169						

TABLA (4.A)

MULTIPLICADORES DE KW PARA DETERMINAR LOS KILOVARS EN CAPACITORES REQUERIDOS PARA CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA.

3. TECNICAS PARA CORREGIR EL BAJO f.p. CON CAPACITORES.

En un centro de consumo es necesario precisar bajo que condiciones de carga se obtiene la magnitud de KW, que interviene en la expresión (4.6). Esta carga puede ser constante ó variable.

La carga constante se presenta en cierto tipo de industrias que, debido a sus procesos continuos de producción, mantienen un consumo de KW prácticamente constante durante casi todo el tiempo de operación.

La carga variable se presente en diversas industrias en las que, debido a las características de sus procesos de producción, entran y salen cargas a intervalos irregulares de tiempo, ya sean cortos (horas o días) ó largos (meses).

Debido a las variantes anteriores es difícil establecer un criterio uniforme para determinar la cantidad de KVAR a instalar, pero se pueden establecer algunos criterios generales a seguir para el cálculo de ésta cantidad, en base a las condiciones de la carga y los objetivos prioritarios que se persiguen con la corrección del bajo factor de potencia; estos objetivos pueden ser en orden de importancia:

- A.- evitar la penalidad aplicada por parte de la compañía suministradora de energía eléctrica.
- B.- aumentar la capacidad del sistema.
- C.- mejorar los niveles de voltaje de operación del sistema.

A. EVITAR LA PENALIDAD APLICADA POR LA COMPAÑIA SUMINISTRADORA

En la mayoría de los casos el evitar ésta penalidad es el objetivo principal que se persigue al corregir el bajo f.p. En este caso, dado que son los valores promedio medidos los que se involucran para obtener la facturación, se puede partir de ellos para obtener el f.p. al que se está operando, utilizando la expresión (4.8) o sea:

$$f.p. = \frac{KWH}{\sqrt{(KWH)^2 + (KVARH)^2}}$$

obteniendo los datos KWH y KVARH de los mismos recibos de facturación periódica de la compañía suministradora.

Si la carga se considera constante, para obtener los KW promedio de la carga, basta dividir los KWH por las horas de operación de la planta durante el período de facturación. Con estos datos prácticamente se tiene todo lo necesario para corregir el f.p. al valor deseado, aplicando la expresión (4.6).

Si la carga es variable el valor KW que interviene en la expresión (4.6) puede ser tomada de la demanda máxima medida por la compañía suministradora, siempre y cuando no difiera mucho de la demanda promedio, resultante de dividir los KWH entre las horas de operación durante el período de facturación y tomando el $f.p._2 = 0.86$ aproximadamente.

En caso contrario, o sea que la carga sea muy variable, será necesario tomar varias lecturas, a diferentes tiempos de KW y KVAR, establecer sus gráficas correspondientes, y de acuerdo a estas últimas, por medio de su integración llegar a determinarlos $KVAR_c$ capacitivos necesarios para llegar al factor de potencia deseado. Este análisis, al mismo tiempo nos señalará -- las ventajas o desventajas de compensar en grupo o individualmente, como se verá en los párrafos posteriores.

B. AUMENTO DE LA CAPACIDAD DEL SISTEMA

En algunos casos el objeto principal de corregir un bajo f.p., es el de aprovechar la corriente liberada por los transformadores de potencia a efecto inmediato de la corrección del f.p. en el lado de baja tensión.

En este caso es necesario determinar primero, en forma precisa, la capacidad de liberar.

Esto es:

$\% \Delta KW$ = porcentaje del incremento de potencia

y en función de ésta, el factor de potencia deseada (f.p.2)

Así el aumento de capacidad de carga, en % de KW instalados, sería:

$$\% \Delta KW = 100 \left(\frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} - 1 \right) \quad (4.11)$$

Y de esta expresión podemos obtener el factor de potencia deseado (f.p.2).

$$\cos \theta_2 = \cos \theta_1 \left(\frac{\% \Delta KW}{100} + 1 \right) \quad (4.11a)$$

o bien, si la corrección del f.p. se hace en el lado de baja tensión de un transformador, con una capacidad de KVA, la potencia activa disponible que se obtiene al pasar de un bajo f.p. ($\cos \theta_1$ ó f.p.₁) a un valor corregido $\cos \theta_2$ (f.p.₂), puede calcularse según la expresión:

$$\begin{aligned} \Delta KW &= KW_2 - KW_1 \\ &= KVA (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \end{aligned} \quad (4.12)$$

donde: KW_1 = potencia activa disponible antes de corregir el factor de potencia.

KW_2 = potencia activa disponible después de corregir el factor de potencia.

$\cos \theta_2$ = factor de potencia corregido

$\cos \theta_1$ = factor de potencia existente

El $\cos \theta_1$ se determina por alguno de los métodos expuestos en el capítulo III y en el momento en que el sistema se encuentre a plena carga.

En el caso en que los transformadores se encuentren sobrecargados y se intente corregir esta sobrecarga, a base de mejorar el bajo-

f.p., se puede proceder de la siguiente forma:

Se calcula el f.p. que se tiene con la expresión:

$$\cos \theta_1 = \frac{KW}{KVA + \Delta KVA} \quad (4.13)$$

donde: ΔKVA = es el valor de la sobrecarga (ó sea la diferencia-entre el consumo actual de potencia aparente y la capacidad nominal de los transformadores).

KVA = es el valor de la capacidad nominal de los transformadores.

KW = es el consumo actual de potencia activa de la carga instalada.

Se calcula el f.p. que es necesario alcanzar para operar sin sobrecarga con la expresión:

$$\cos \theta_2 = \frac{KW}{KVA} \quad (4.14)$$

Una vez calculados los valores $\cos \theta_1$ y $\cos \theta_2$ se puede calcular, por medio de la expresión (4.6), la potencia reactiva capacitiva que es necesario instalar.

La potencia activa (en KW) que intervendrá en dicha expresión

$$KVAR_c = KW (\tan \theta_1 - \tan \theta_2)$$

en ambos casos será la que alimentará el transformador una vez corregido el f.p. o sea será KW_2 y la expresión quedará:

$$KVAR_c = KW_2 (\tan \theta_1 - \tan \theta_2)$$

C. MEJORAR EL NIVEL DEL VOLTAJE DE OPERACION

En el capítulo II se mostró la importancia que tiene, para la regulación del voltaje de operación, el aumentar el bajo f.p. existente en las horas de mayor demanda en cualquier sistema eléctrico

co industrial.

Cuando crece la demanda de potencia activa (KW) es necesario evitar que se abata el voltaje, y si en esos momentos el sistema opera con un bajo f.p. el hecho de compensarlo logra en gran parte mantener el nivel de tensión deseada.

Ambos efectos pueden lograrse controlando la potencia de los bancos de capacitores instalados en la línea de distribución o en la carga.

La elevación de voltaje lograda, al conectar un banco de capacitores de potencia reactiva Q al final de una línea de distribución, puede calcularse según la expresión:

$$\% e = \frac{X}{10 (KW)^2} Q \quad (4.15)$$

donde: Q = es la potencia reactiva del banco de capacitores en KVAR.

X = es la reactancia total por fase de la línea en ohms

KV = es el voltaje nominal de línea en KILOVOLTS.

En la práctica este tipo de regulación se efectúa en forma automática por medio de controles adecuados. En caso de que las fluctuaciones de carga sean demasiado grandes, debe pensarse en la conveniencia de instalar un banco de capacitores, de secciones desconectables, que entren automáticamente en servicio siguiendo las fluctuaciones de carga reactiva y/o el voltaje del sistema.

3. TECNICAS PARA CORREGIR EL BAJO F.P.

3.1 METODOS PRINCIPALES DE COMPENSACION

Existen dos maneras de corregir el factor de potencia de cargas inductivas por medio de capacitores, a saber:

- A) Compensación en grupo
- B) Compensación individual

Existe una tercera forma (C) que sería una combinación de las dos anteriores. Cada una tiene ventajas de tipo técnico ó económico, con respecto a las otras.

A) COMPENSACION EN GRUPO

Cuando el motivo principal de instalar capacitores es el de corregir el factor de potencia para evitar las multas y no el de minimizar las pérdidas por efecto de Joule, la solución mas conveniente suele lograrse corrigiéndose el factor de potencia de la instalación eléctrica en forma global. Esta suele ser también la mejor solución si lo que se pretende es aumentar la capacidad de carga activa de los transformadores ó mejorar niveles de voltaje.

Si la carga de la instalación industrial no está sujeta a fuertes variaciones basta con instalar un banco de capacitores fijo que, en condiciones de plena carga, corrija el factor de potencia global a un valor ligeramente mas alto que el mínimo admitido por la compañía eléctrica suministradora.

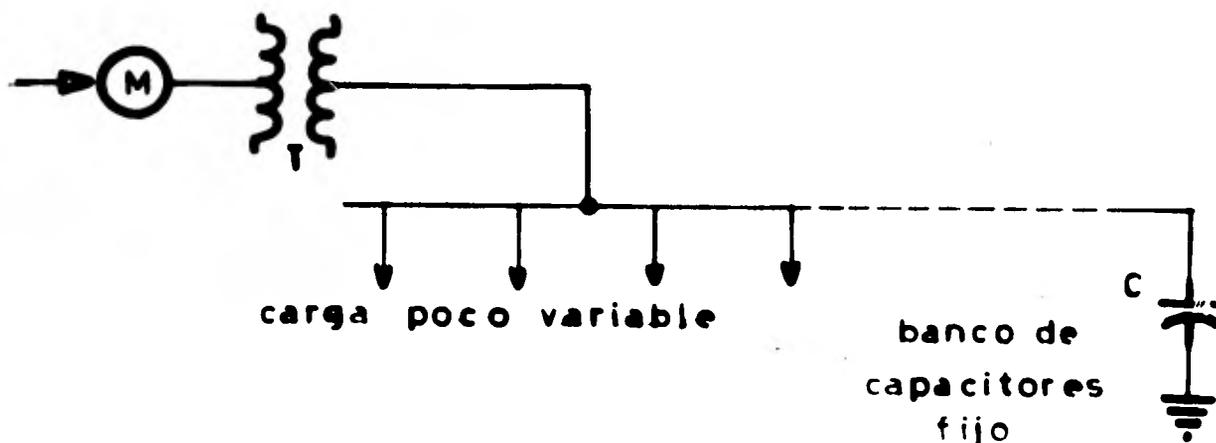


FIG. (4.7) DIAGRAMA PARA COMPENSACION EN GRUPO

En casos de cargas muy variables en que se desee mantener un f.p. próximo a la unidad, para cualquier condición de carga, resulta conveniente instalar un banco dividido en secciones desconectables que entren y salgan de operación manual ó automáticamente de acuerdo a la demanda de potencia reactiva.

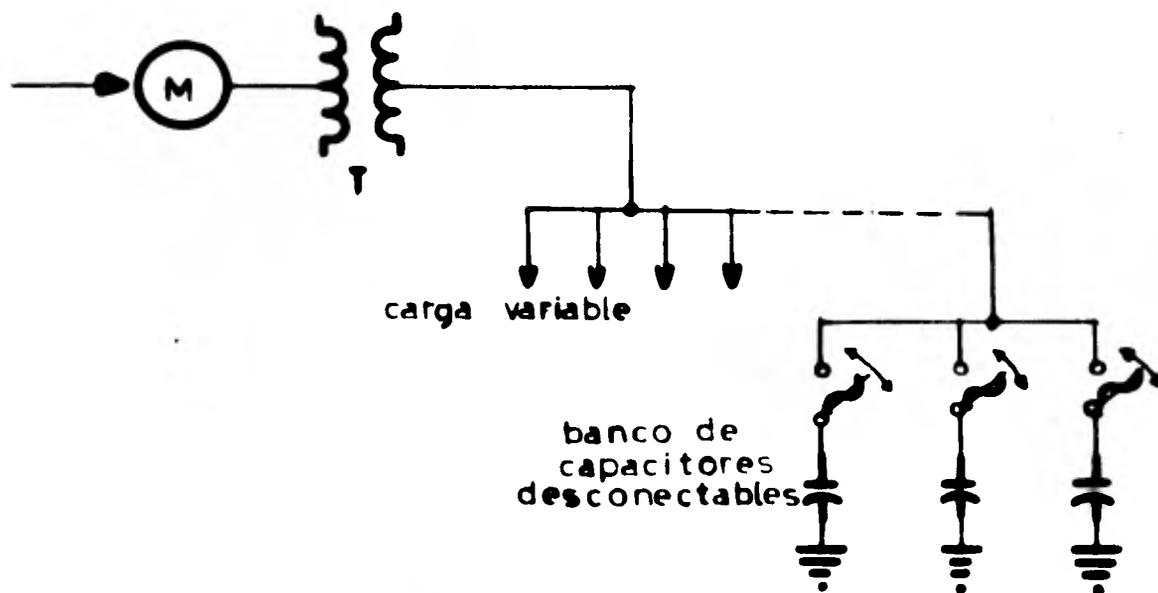


FIG. (4.8) DIAGRAMA PARA COMPENSACION EN GRUPO

A.1) RESONANCIA Y COMPENSACION DE TRANSFORMADORES

La resonancia es un fenómeno bastante importante que se presenta en sistemas oscilatorios sometidos a excitaciones periódicas, se caracteriza por la gran magnitud de la respuesta a una excitación dada. Se presenta un estado de resonancia cuando la frecuencia de la excitación, es de igual valor a la frecuencia natural del sistema.

La siguiente figura (4.9) muestra un caso ideal de un transformador de potencia que alimenta una carga puramente inductiva de inductancia L_c compensada por una batería de capacitores de capacitancia C .

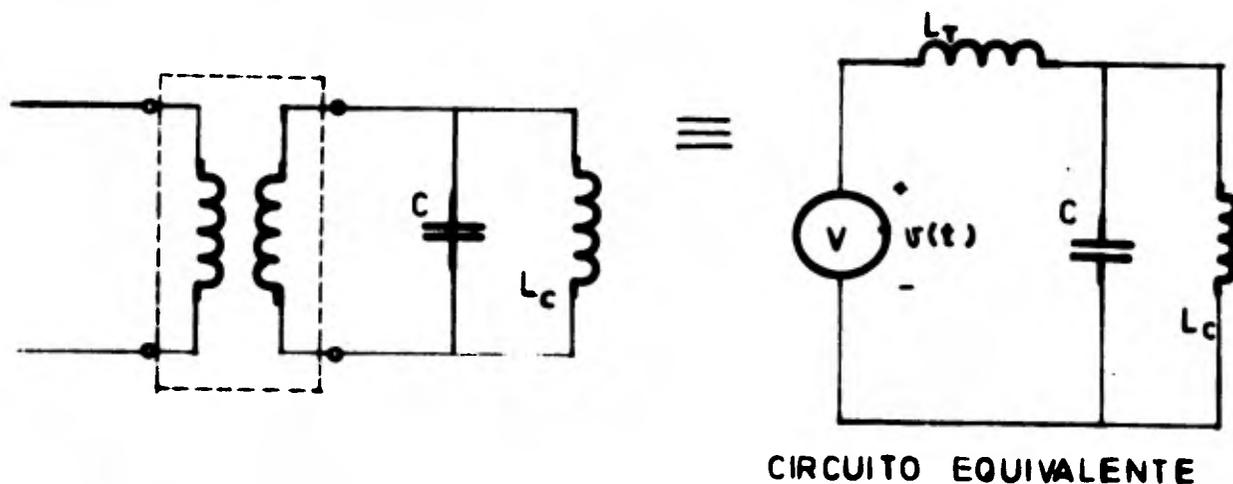


FIG. (4.9)

donde: L_T = es la inductancia equivalente del transformador.
 $v(t)$ = es el voltaje secundario del transformador.

El equivalente de Northon del transformador es:

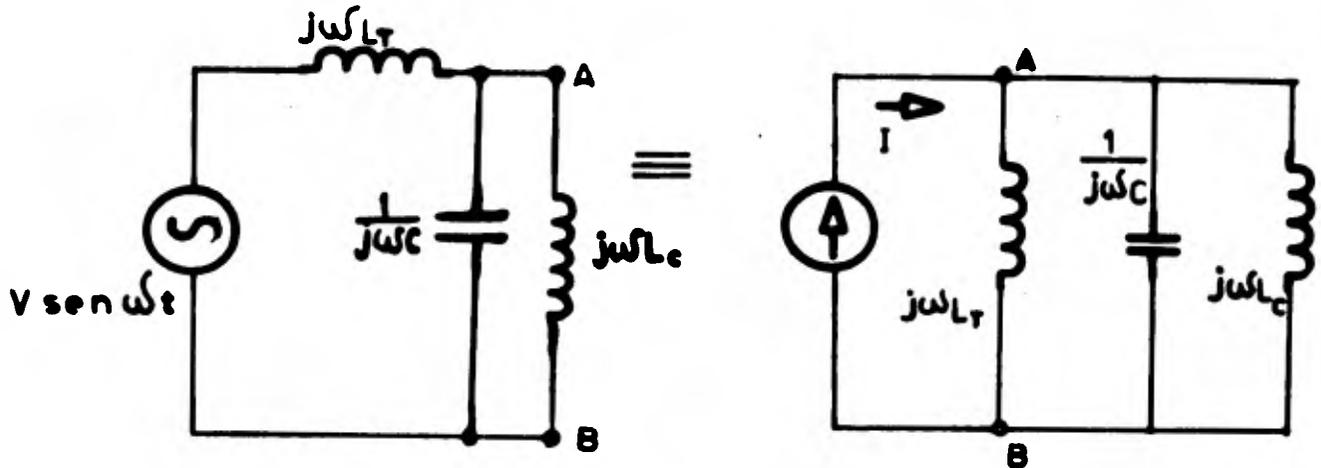


FIG. (4.10)

donde: $I = \frac{V \text{ sen } \omega t}{j\omega L_T}$

$$V_{AB} = Z_T I ; \quad Z_T = \frac{j\omega L_T L_C}{L_T + L_C - \omega^2 L_T L_C C}$$

entonces: $V_{AB} = \frac{V \text{ sen } \omega t L_C}{L_T + L_C - \omega^2 L_T L_C C}$ o sea:

$$V_{AB} = \frac{V \text{ sen } \omega t L_C}{L_T (1 - \omega^2 L_C C) + L_T} \quad (4.11)$$

Teóricamente el voltaje V_{AB} crece a infinito cuando $L_T + L_C - \omega^2 L_T L_C C = 0$ o sea cuando:

$$\omega^2 = \frac{L_T + L_C}{C L_T L_C} = \frac{1}{C L_E} \quad \text{donde } L_E = \frac{L_T L_C}{L_T + L_C}$$

Podemos analizar el caso en el que los capacitores aparecen junto con el transformador en vacio (o sea sin L_C), el voltaje V_{AB} en tre bornes del transformador será:

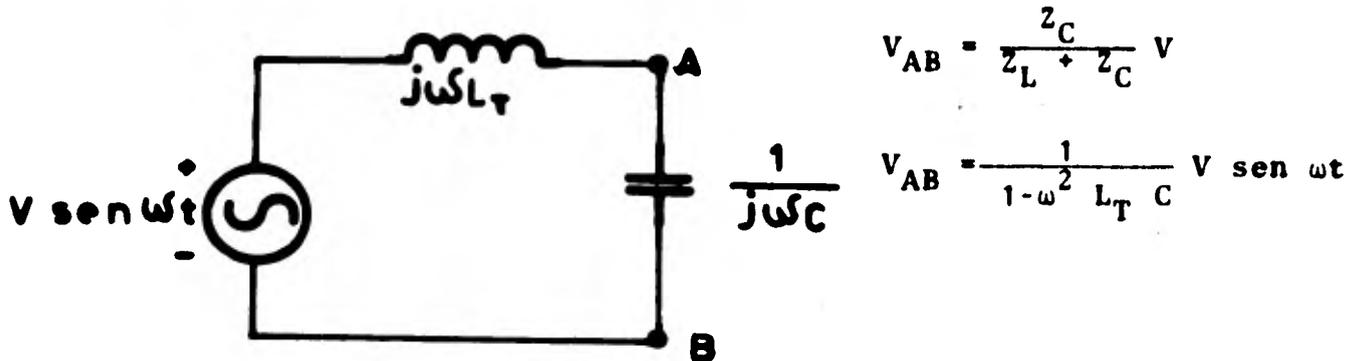


FIG. (4.11)

La frecuencia de resonancia viene dada por la expresi3n:

$$1 - \omega^2 C L_T = 0$$

Si a la frecuencia nominal de la red, la potencia reactiva de los capacitores es el mismo orden de magnitud que la potencia nominal de los transformadores se tiene que:

$$\frac{V_n^2}{X_T} = \frac{V_n^2}{X_C}$$

siendo X_C la reactancia de los capacitores de la expresi3n anterior se tiene que:

$$X_T = X_C \text{ y de aqui } 1 - \omega^2 C L_T = 0$$

Es decir existiria el peligro de que se presentase el fen3meno de resonancia a la frecuencia nominal de la red o con alguna de las arm3nicas

Asf:

$$\omega^2 = \frac{1}{L_E C}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_E C}}; \quad \omega_n = \sqrt{\frac{1}{L_E C}} \quad (4.12)$$

donde: ω_n = es la frecuencia natural del sistema.

El sistema será resonante si $\omega = \omega_n$, pero dado que la finalidad de los capacitores es corregir el factor de potencia, debe verificarse que

$$j\omega L_c + \frac{1}{j\omega C} = 0$$

$$\text{si } \omega^2 = \frac{1}{L_c C} \text{ y } \omega = \frac{1}{\sqrt{L_c C}} \quad (4.18)$$

si ω_n es mayor a ω , a la frecuencia nominal, no existe peligro de resonancia.

Como la potencia nominal del transformador debe ser mayor que la de la carga se debe verificar que:

$$\frac{V_n^2}{X_T} \text{ es mayor que } \frac{V_n^2}{X_{L_c}}, \text{ o sea } \left(\frac{V_n^2}{X_T} > \frac{V_n^2}{X_{L_c}} \right)$$

Siendo X_T y X_{L_c} las reactancias del transformador y de la carga respectivamente y V_n el voltaje nominal del sistema. Esta relación implica que:

$$L_T < L_c$$

y por consiguiente L_E es mucho menor que L_c ($L_E \ll L_c$), y de aquí que $\omega_n \gg \omega$.

Esto quiere decir que la resonancia solo es posible a frecuencias relativamente altas y no constituye un peligro en la operación normal de los capacitores.

Como vemos, es algo difícil que se presenten las condiciones para que el sistema entre en resonancia. Una regla práctica es no colocar bancos de capacitores mayores de $\frac{2}{3}$ de la capacidad de los transformadores, o sea:

$$\text{KVAC} < \frac{2}{3} \text{KVA.}$$

Es aconsejable también que, cuando los transformadores operen en vacío, desconectar algunos bancos de capacitores,

Para la aplicación individual de capacitores a los aparatos inductivos es conveniente guiarse por la tabla siguiente (tabla 4.B) donde se prevee para los transformadores ó aparatos inductivos similares una capacidad del 15 al 20% de los KVA.

TRANSFORMADORES O SIMILARES		MOTORES (PAR DE ARRANQUE Y CORRIENTE NORMALES)			
		C.P. ó H.P.	4 POLOS	8 POLOS	12 POLOS
KVA	KVAC		KAVC		
30	4.5 - 6	40	7.5 - 10	10 - 13	15 - 20
45	7 - 10	50	10 - 12	13 - 16	20 - 25
50	7.5 - 10	60	12 - 15	16 - 20	25 - 30
75	12.5 - 15	75	15 - 20	20 - 25	30 - 40
112.5	20 - 25	100	20 - 25	25 - 30	40 - 50
150	25 - 30	125	25 - 30	30 - 40	50 - 55
200	30 - 40	150	30 - 35	40 - 45	55 - 60
300	45 - 60	200	35 - 40	45 - 50	60 - 70
400	60 - 80	250	40 - 50	50 - 65	70 - 80
500	80 - 100	300	50 - 60	65 - 70	80 - 90
750	110 - 150	350	60 - 65	70 - 80	90 - 100
1000	150 - 200	400	65 - 70	80 - 90	100 - 110
1200	200 - 300	450	70 - 75	90 - 95	110 - 120
		500	75 - 80	95 - 100	120 - 130

TABLA 4.B

B) COMPENSACION INDIVIDUAL

Este tipo de compensación es el mas deseable técnicamente. Consiste en instalar los capacitores junto a cada una de las cargas que consumen potencia reactiva compensando, individualmente, su factor de potencia.

Esta instalación presenta la ventaja de asegurar un buen factor de potencia, independientemente de las condiciones de la carga, - asi como reducir al mínimo las pérdidas por efecto de Joule en la instalación eléctrica. Además la compensación individual sue le evitar la necesidad de un dispositivo especial para conectar y desconectar el banco de capacitores ya que, en muchos casos, - los capacitores pueden operarse con el mismo dispositivo de cone xión y desconexión de la carga que van a compensar.

Una de las principales desventajas de éste método es la económica, ya que resulta demasiado caro con relación a la compensación en grupos. Ya que al no trabajarse al 100% de la carga instalada, tal como sucede en la práctica, una parte considerable de -- los capacitores suele estar siempre fuera de operación.

C) COMPENSACION MIXTA

En caso de instalaciones eléctricas que cuentan con grandes moto res u otros equipos, que consumen una gran cantidad de potencia reactiva, suele ser conveniente el adoptar una compensación mixta, la cual consiste en compensar individualmente los aparatos - de gran consumo de potencia e instalar para el resto de la carga un solo banco fijo ó dividido en secciones desconectables.

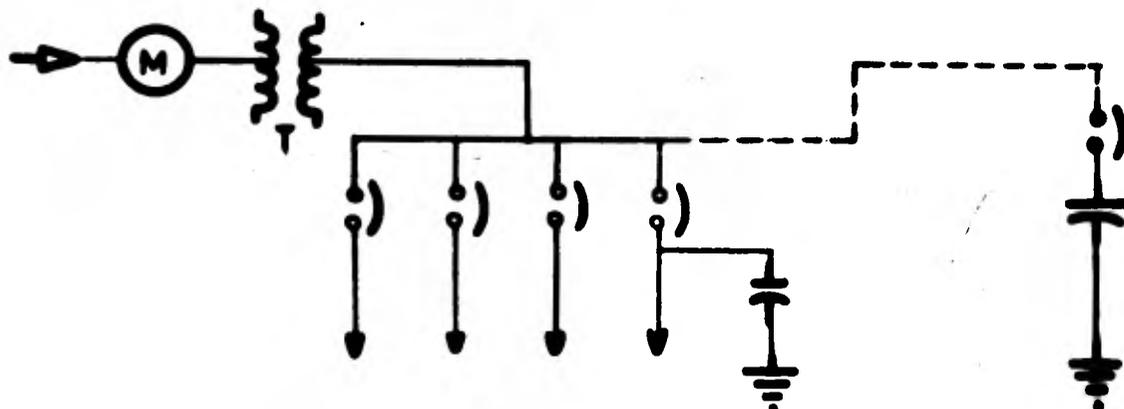


FIG. (4.12) CONEXION PARA COMPENSACION MIXTA

B.1) COMPENSACION INDIVIDUAL DE MOTORES

La mayoría de las cargas de tipo inductivo de cualquier industria son en casi todos los casos motores de inducción.

El factor de potencia de un motor de inducción tiene un valor de diseño a plena carga entre 0.8 y 0.9 dependiendo de la velocidad y tipo del motor. Sin embargo al bajar la carga el factor de potencia disminuye rápidamente tal como se muestra en la gráfica de la figura (4.13).

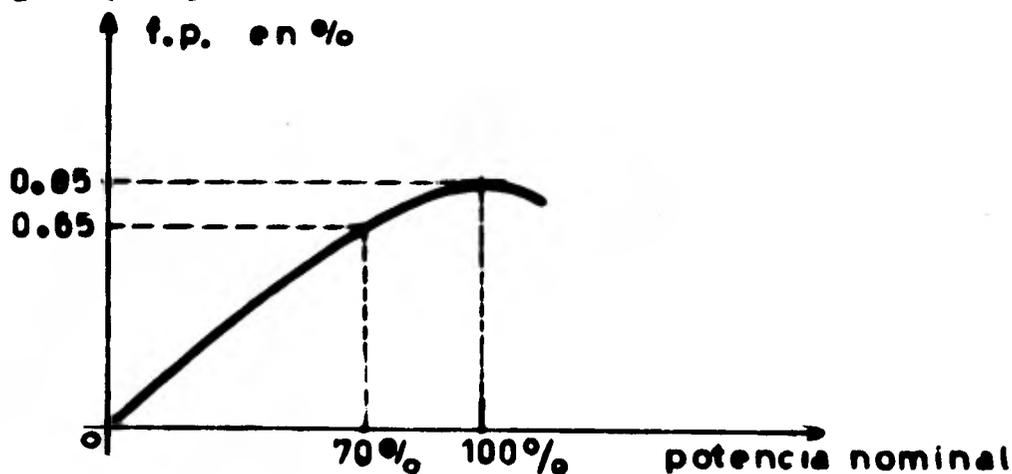


FIG. (4.13)

Generalmente los motores de inducción por diversas razones no operan a plena carga debido a que es usual la costumbre de utilizar motores de mayor potencia que la requerida para mover las cargas. Como resultado de ésto no se opera con el f.p. máximo (0.85). -- Otro de los factores que disminuyen el f.p. en los motores de inducción es el de utilizarlos a tensiones superiores a la nominal, la fuerte inducción a que da lugar una tensión exagerada exige -- una corriente magnetizante mayor que a la tensión nominal.

Otro factor que afecta al f.p. es el utilizar motores lentos. -- Los motores de velocidad reducida presentan en igualdad de condiciones un $\cos \phi$ inferior a los motores de gran velocidad.

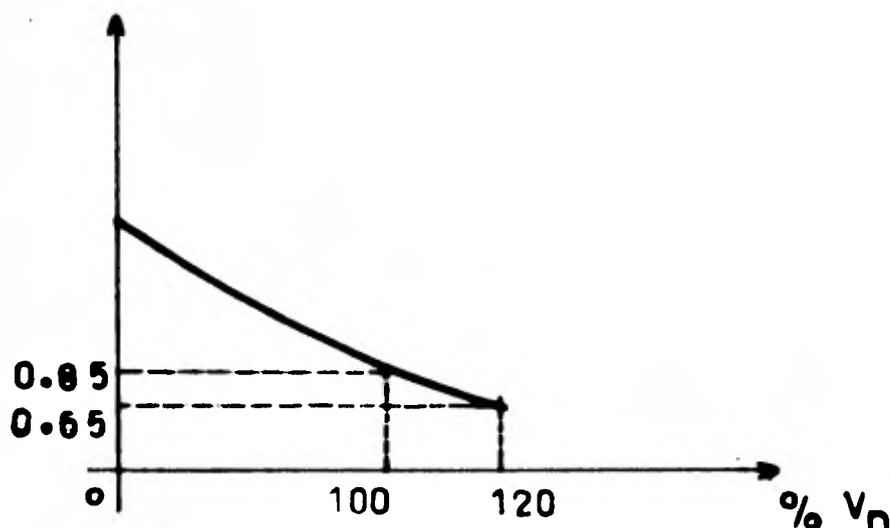


FIG. (4.14)

Si se evita en una instalación de motores caer en situaciones anteriores el factor de potencia a corregir será en un pequeño margen de KVAR capacitivos.

B.2) FACTORES QUE LIMITAN EL TAMAÑO DEL BANCO DE CAPACITORES EN MOTORES.

La potencia reactiva demandada por el motor en función de la potencia activa demandada y el factor de potencia del motor se puede expresar como:

$$Q = P \sqrt{\frac{1 - f.p.}{f.p.}}$$

(4.19)

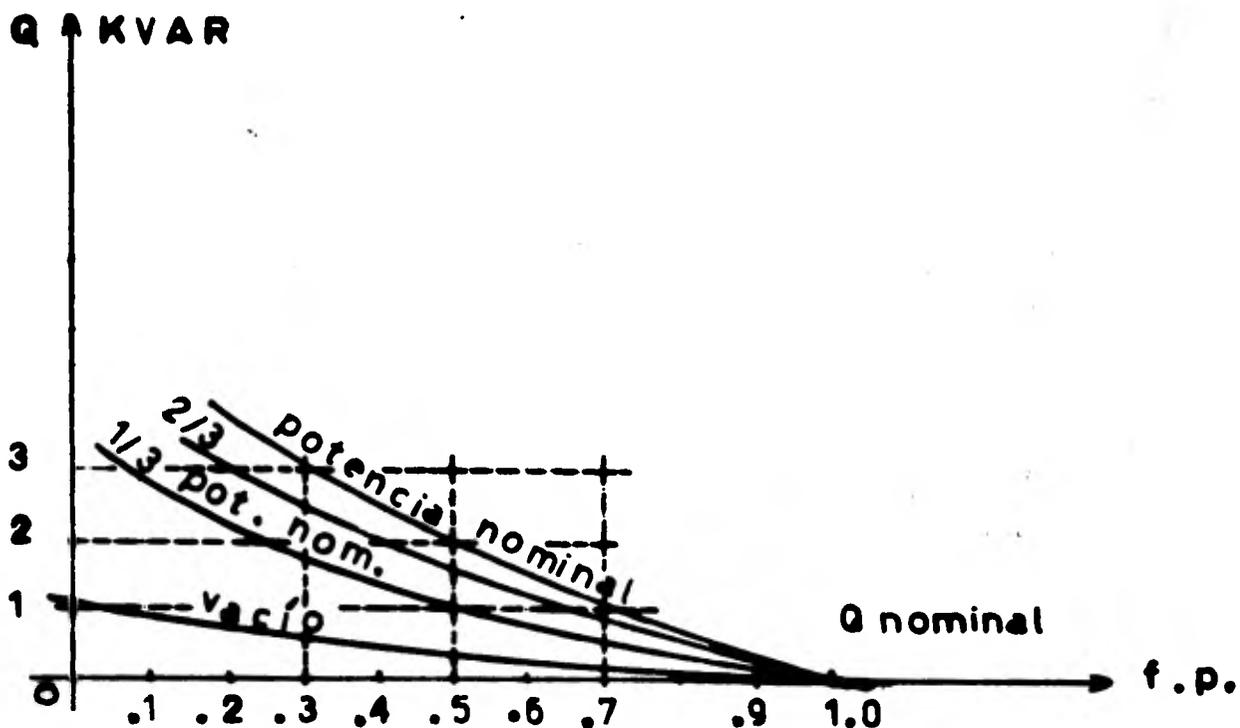


FIG. (4.15)

La curva de $Q - f.p.$ es en la figura (4.16)

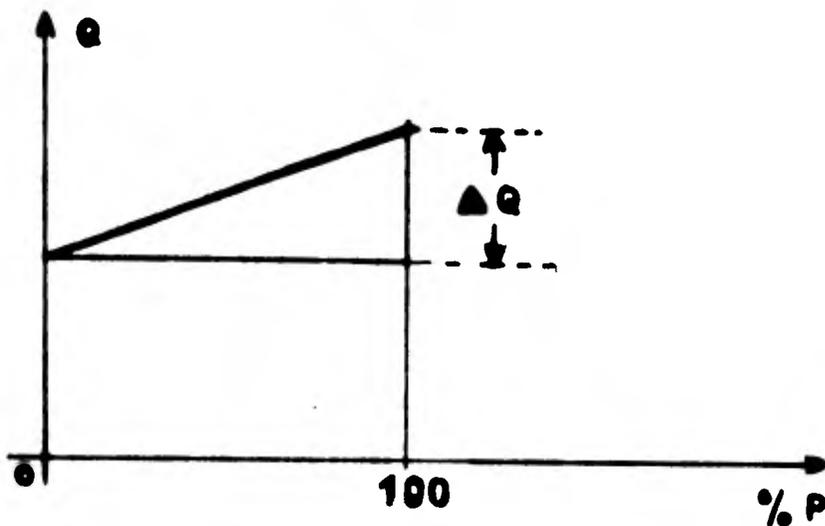


FIG. (4.16)

Como se puede ver la potencia reactiva demandada por el motor desde marcha en vacio hasta plena carga varia ΔQ . Como consecuencia de lo anterior, cuando se compensa individualmente este tipo de motores, el capacitor ó banco de capacitores instalado no debe ajustarse a las condiciones de plena carga ya que ésto podria ocasionar un exceso de potencia reactiva cuando opere en condiciones de baja carga ó marcha en vacio.

Otro factor que limita el tamaño del banco de capacitores es el fenómeno llamado AUTOEXCITACION DEL MOTOR, que puede originarse en el momento de la desconexión. Este fenómeno consiste en lo siguiente:

Al desconectar un motor de inducción compensado individualmente, ya que los capacitores quedan permanentemente conectados a los bornes del motor, la corriente entre el capacitor y el motor no se interrumpe sino que se mantiene debido a la energia almacenada en sus campos. Esto provoca que se mantenga el campo magnético en las bobinas del motor generándose una tensión de autoexcitación mientras el motor sigue girando. Este voltaje de autoexcitación dependerá de la corriente del capacitor y en consecuencia de si la capacidad del banco es alta.

La velocidad del motor normalmente al interrumpir la alimentación tiende a disminuir; cuando la velocidad decrece en un 15 ó 20% la autoexcitación se elimina, pero en algunos casos de cargas con gran inercia la velocidad se mantiene por algunos minutos y la sobretensión se mantiene.

Si los capacitores están excedidos en potencia reactiva ésta sobretensión puede alcanzar valores considerablemente más altos que la tensión nominal del motor poniendo en peligro tanto el aislamiento del motor como a los mismos capacitores.

La figura (4.17) muestra tres capacitores de diferente tamaño (gráficas) de los cuales solo C_1 no produce voltaje de autoexcitación. Los voltajes de autoexcitación son mostrados por las in-

tersecciones de las curvas de volt-amperes del capacitor y la curva de saturación en vacío del motor.

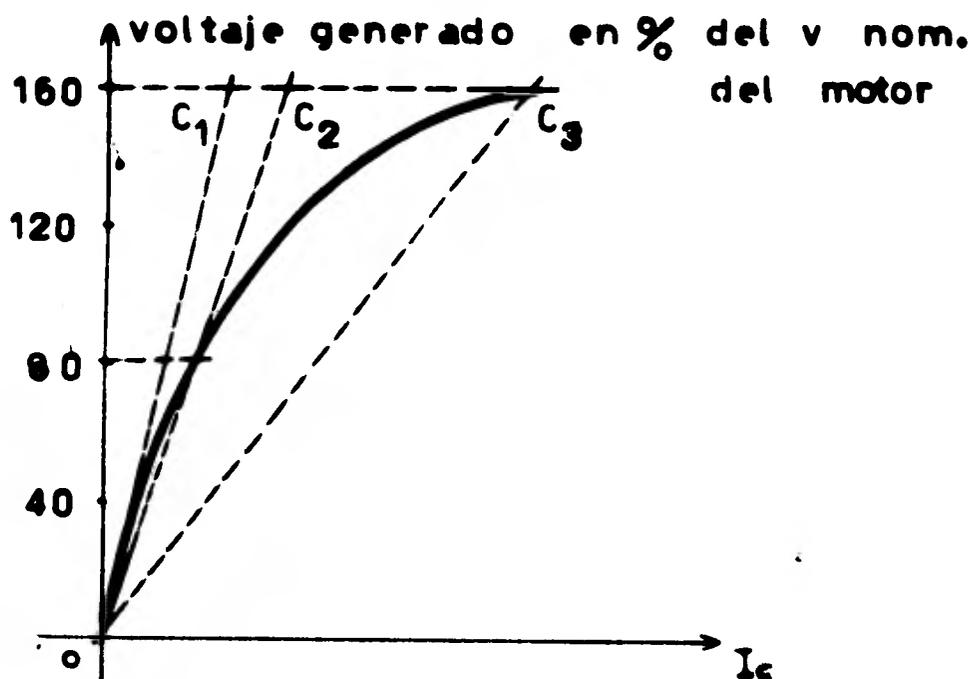


FIG. 4.17 CORRIENTE MAGNETIZANTE DEL CAPACITOR Y DEL MOTOR EN % DE LA NOMINAL DEL MOTOR.

Para evitar los problemas de la autoexcitación se debe procurar - que la potencia del banco no exceda las necesidades de potencia reactiva del motor para marcha en vacío. Corrigiendo el f.p. en vacío a un valor próximo a 100% puede obtenerse un f.p. a plena carga del orden de un 95% sin que se exceda en ningún momento la demanda de potencia reactiva del motor.

Existen tablas donde se da una orientación de la cantidad de KVAR capacitivos adecuada a distintos motores en función de su potencia, velocidad y régimen de carga. En la tabla 4.C es una tabla usada para estos fines.

La conexión típica para compensar un motor individualmente es la siguiente fig. (4.18).

TABLA 4C

KVAR APROXIMADOS, NECESARIOS EN CAPACITORES PARA MEJORAR EL FACTOR DE POTENCIA DE MOTORES DE INDUCCION TIPICOS.

N.P.	SVM plena carga	50% de carga				75% de carga				Carga plena			
		85%	90%	95%	100%	85%	90%	95%	100%	85%	90%	95%	100%
1	1730	0.33	0.39	0.47	0.47	0.74	0.34	0.43	0.48	0.17	0.23	0.40	0.71
1	1135	0.33	0.40	0.48	0.44	0.38	0.48	0.60	0.84	0.29	0.42	0.37	0.91
1	835	0.83	0.90	0.96	1.2	0.49	0.80	0.97	1.2	0.63	0.77	0.93	1.3
1 1/2	3500	0.50	0.59	0.71	0.95	0.31	0.43	0.42	0.94	0.19	0.38	0.40	1.1
1 1/2	1740	0.48	0.58	0.49	0.94	0.28	0.42	0.59	0.93	0.11	0.32	0.32	0.99
1 1/2	1125	0.44	0.56	0.67	0.91	0.31	0.46	0.63	0.98	0.19	0.39	0.61	1.1
1 1/2	875	1.0	1.1	1.3	1.5	0.93	1.1	1.2	1.4	0.78	0.97	1.2	1.6
2	3470	0.44	0.59	0.75	1.1	0.30	0.40	0.72	1.2	0.10	0.34	0.47	1.3
2	1740	0.44	0.57	0.72	1.0	0.24	0.45	0.44	1.1	0.05	0.30	0.39	1.2
2	1140	0.47	0.60	0.94	1.3	0.32	0.71	0.93	1.4	0.34	0.59	0.89	1.3
2	865	1.0	1.2	1.3	1.6	0.77	0.96	1.2	1.6	0.63	0.91	1.3	1.8
3	3420	0.43	0.45	0.87	1.3	0.17	0.43	0.78	1.5	.....	0.39	0.83	1.8
3	1720	0.53	0.73	0.93	1.4	0.14	0.44	0.77	1.4	.....	0.23	0.47	1.6
3	1160	1.0	1.2	1.4	1.9	0.71	0.99	1.3	2.0	0.29	0.62	1.1	2.8
3	840	1.3	1.4	1.4	2.1	0.93	1.2	1.4	2.2	0.84	1.2	1.7	2.6
4	3440	0.70	1.1	1.5	2.2	0.45	0.92	1.3	2.4	.....	0.63	1.4	2.9
4	1735	0.59	0.90	1.2	2.0	0.17	0.42	1.1	2.2	.....	0.25	0.94	3.4
4	1155	1.3	1.4	1.7	2.7	0.70	1.2	1.7	2.3	0.23	0.84	1.3	3.8
4	860	1.7	2.0	2.4	3.1	1.3	1.7	2.2	3.3	0.94	1.5	2.2	3.7
7 1/2	3450	0.89	1.4	1.9	3.0	0.19	0.82	1.4	3.3	.....	0.38	1.4	3.7
7 1/2	1743	0.77	0.73	1.3	2.4	0.42	1.2	2.9	.....	0.37	1.4	3.4	
7 1/2	1160	1.3	1.8	2.3	3.4	.....	1.3	2.1	3.8	0.28	1.3	3.3	4.8
7 1/2	865	3.7	3.1	3.7	4.8	1.8	2.3	3.3	4.9	1.4	2.3	3.3	3.7
10	3470	0.33	0.94	1.7	3.1	.....	0.19	1.2	3.4	.....	.....	1.2	4.2
10	1750	1.2	1.8	2.4	3.9	0.34	1.2	2.2	4.4	.....	1.3	2.4	3.8
10	1160	1.2	1.8	2.4	3.9	0.52	1.4	2.4	4.4	.....	1.3	2.6	3.4
10	875	3.4	4.0	4.7	6.2	2.3	3.4	4.6	6.3	1.8	3.0	4.3	7.2
15	3500	0.70	1.4	2.4	4.9	.....	0.82	2.4	5.7	.....	0.75	2.9	7.3
15	1748	0.47	1.5	2.5	4.4	.....	1.3	2.8	5.9	.....	1.8	3.8	6.1
15	1165	1.9	2.8	3.9	5.9	0.75	2.1	3.5	6.7	.....	1.7	3.8	6.8
15	875	4.7	5.4	6.4	8.8	3.4	4.9	6.4	9.3	2.7	4.4	6.3	10.7
20	1740	3.0	6.1	5.5	8.3	0.99	2.7	4.7	6.8	.....	1.8	4.9	10.8
20	1178	2.3	3.7	5.1	8.0	0.99	2.7	4.7	8.9	.....	2.3	4.9	10.3
20	875	3.3	6.4	7.8	10.4	3.7	5.4	7.4	11.5	3.1	5.4	8.1	13.4
25	1740	2.8	4.2	5.9	9.3	0.82	2.9	3.4	10.3	.....	1.7	5.0	11.9
25	1178	3.8	4.3	6.1	9.5	1.2	3.3	3.8	10.9	.....	2.8	6.1	12.9
25	890	4.4	6.0	7.7	11.2	2.9	5.1	7.4	12.8	2.2	5.1	6.4	15.3
30	1740	1.3	3.0	3.9	9.2	.....	1.8	4.3	10.7	.....	1.8	4.9	13.1
30	1173	3.7	3.4	7.4	11.4	1.3	4.8	7.0	13.2	.....	3.4	7.3	13.5
30	880	3.3	7.0	9.1	13.4	3.0	5.4	6.5	14.8	1.3	4.7	8.7	17.0
40	1745	0.90	3.2	5.9	11.5	.....	1.4	3.3	13.8	.....	0.47	3.4	16.4
40	1173	4.0	4.3	8.9	14.3	0.98	4.4	8.3	16.3	.....	3.4	8.8	19.0
40	878	9.3	11.4	14.3	19.9	6.4	10.0	13.9	22.1	4.4	9.8	16.2	25.3
50	1745	0.34	3.5	6.8	13.8	.....	0.88	3.7	14.0	.....	0.58	7.0	20.4
50	1170	4.4	7.4	18.9	18.2	0.83	5.1	10.1	20.5	.....	3.5	10.9	23.7
50	875	6.4	11.3	14.4	21.5	4.9	9.1	14.0	24.3	3.3	8.9	18.4	29.1
60	1778	3.3	6.8	10.8	19.2	.....	3.1	6.9	21.1	.....	2.1	9.8	26.8
60	1173	4.8	10.3	14.3	22.6	2.0	7.1	13.0	25.4	.....	4.1	11.9	28.2
60	875	10.7	13.4	17.4	23.9	6.4	11.3	17.4	29.7	2.4	9.3	17.3	33.8
75	1778	4.1	8.4	13.3	23.7	.....	2.4	9.8	25.1	.....	.....	9.4	30.0
75	1180	8.4	13.8	17.7	28.3	2.5	8.9	14.2	31.7	.....	6.8	16.3	36.9
75	875	12.8	17.2	22.2	32.8	3.7	10.0	17.3	32.7	.....	8.5	18.3	38.7
100	1778	6.5	12.2	18.7	32.4	.....	5.1	14.7	35.0	.....	3.3	18.1	42.3
100	1180	7.7	13.8	20.0	33.9	.....	6.4	18.0	38.3	.....	4.4	17.3	44.2
100	870	13.7	21.3	28.0	41.9	3.3	11.8	21.4	42.3	.....	9.1	22.3	49.8
125	1778	6.8	13.9	22.0	39.2	.....	4.3	14.2	41.3	.....	1.4	17.3	30.8
125	1180	13.9	21.0	29.2	44.7	2.0	12.4	24.4	50.2	.....	3.7	21.5	53.1
125	890	20.9	28.0	34.1	53.4	8.1	18.7	30.7	54.2	.....	14.1	30.3	64.5
125	785	27.8	35.0	43.3	61.0	14.3	24.9	37.0	62.7	3.4	19.3	38.7	69.8
150	1778	6.8	15.0	24.7	45.2	.....	5.1	19.5	49.8	.....	.....	19.8	39.1
150	1178	11.8	20.0	29.7	50.4	.....	10.0	24.3	54.4	.....	3.4	22.4	62.5
150	875	23.1	33.4	43.4	64.1	9.7	22.4	34.9	67.4	.....	14.8	34.1	71.8
150	780	33.9	41.5	51.4	75.3	17.1	29.8	44.4	75.3	6.5	23.2	42.4	83.3
200	1770	10.8	22.0	34.9	62.1	.....	6.8	23.7	65.8	.....	.....	25.3	79.0
200	1180	15.2	24.5	39.4	64.8	.....	13.3	32.3	72.4	.....	.....	23.3	80.3
200	885	10.7	21.9	34.7	61.8	.....	6.8	25.7	65.8	.....	4.4	21.4	43.3
200	705	33.3	44.4	57.5	85.0	12.4	29.5	44.4	89.1	.....	22.2	47.7	102.0

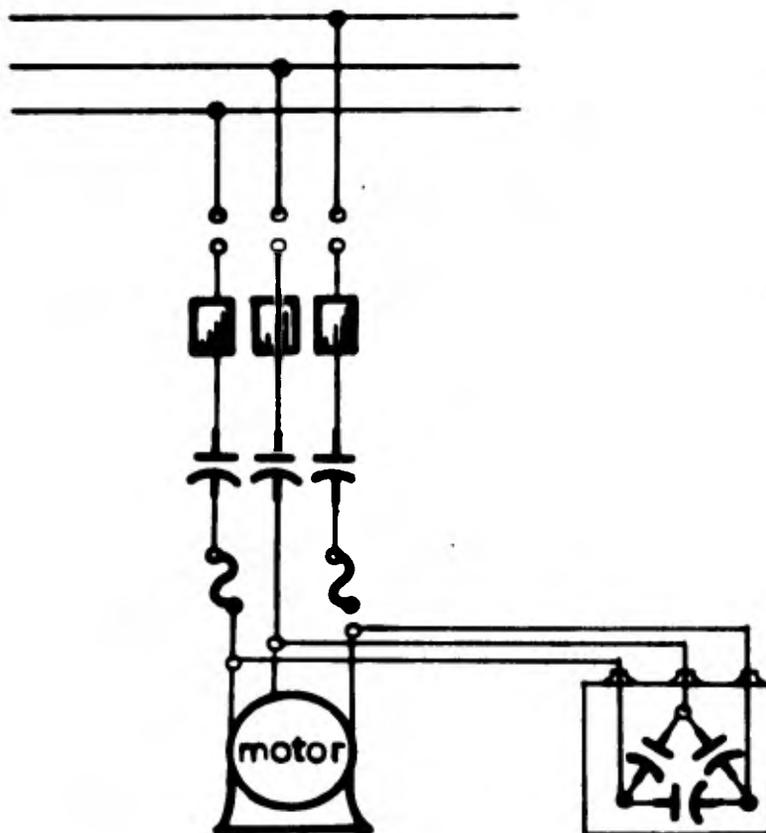


FIG. (4,18)

En este tipo de conexión los capacitores quedan protegidos con los mismos fusibles del motor. Además es posible prescindir de las resistencias de descarga ya que los capacitores pueden descargarse a través del devanado del motor.

Los elementos térmicos deberán ajustarse a la nueva corriente que circulará a través de ellos y ésta será menor. En la tabla 4.C se muestra el porcentaje de reducción de la corriente en función de los KVAR instalados al motor.

B.3) MEDICION DEL FACTOR DE POTENCIA (CORREGIDO) CON UN AMPERMETRO.

Es posible conocer por medio de un solo ampermetro el f.p. antes de corregir y el f.p. corregido (f.p.2). Si la carga es constante durante el intervalo de tiempo de la medida, un ampermetro de -

gancho servirá para medir sucesivamente la corriente absorbido por el motor, la corriente de los capacitores y la corriente resultante.

La construcción gráfica del triángulo de 3 intensidades señalada en la figura (4.19) permite determinar los ángulos ϕ_1 , ϕ_2 y por consiguiente $\cos \phi_1$ y $\cos \phi_2$.

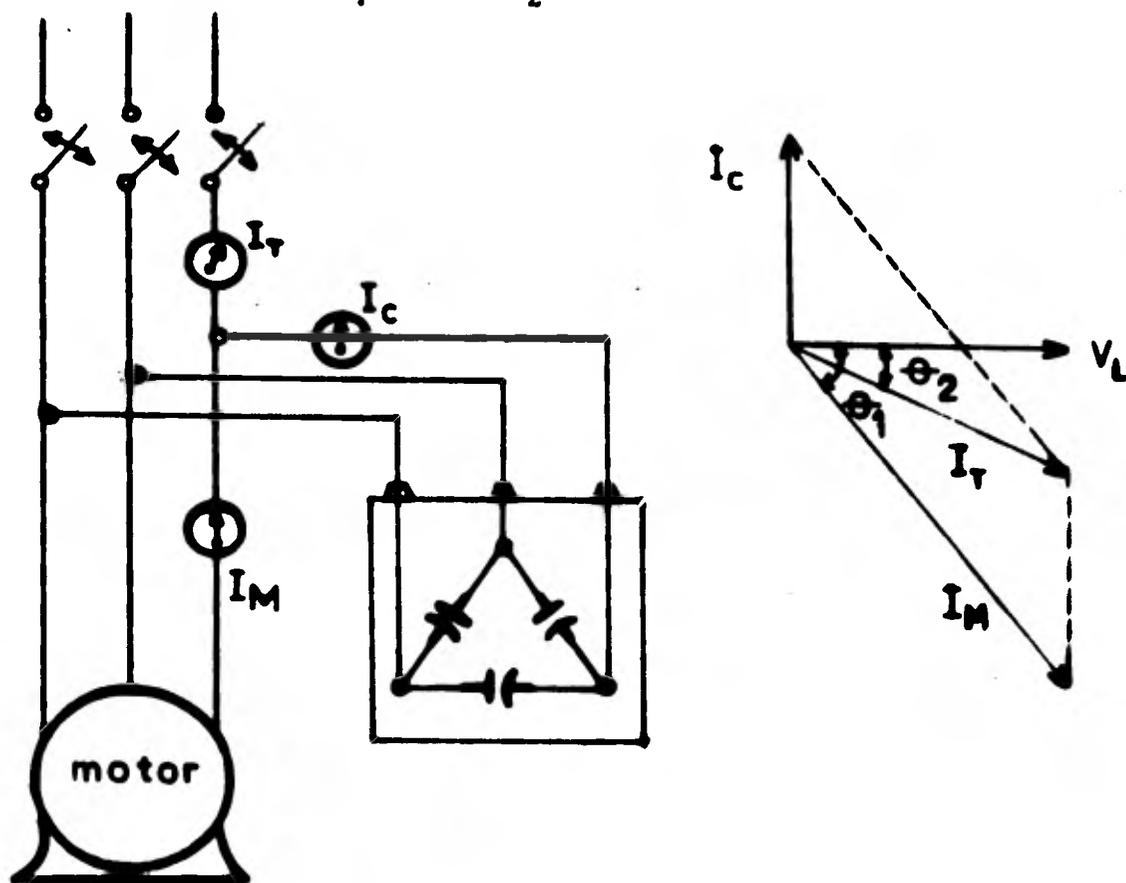


FIG. (4.19)

Por ejemplo:

. Un motor de inducción trifásico, 380 volts, 60 Hz, 25 h.p. con un banco de capacitores de 11.5 KVAR: medimos; $I_M = 33$ amp., --- $I_C = 17$ amp., $I_T = 25$ amp.

Trazando un triángulo semejante al de la figura (4.19).

- 1° trazamos verticalmente I_c con el segmento $\overline{A.B}$
- 2° con centro en A y radio 33 trazamos un arco
- 3° con centro en B y radio 25 trazamos un arco
- 4° la intersección de los arcos será el punto C.

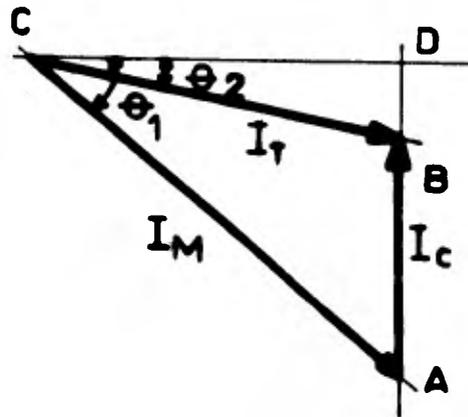


FIG. (4.20)

De modo que:

$$\cos \phi_1 = \frac{CD}{CA} \rightarrow 0.745$$

$$\cos \phi_2 = \frac{CD}{CB} \rightarrow 0.98$$

3.2) LOCALIZACION DE LOS CAPACITORES

La capacidad de la instalación eléctrica industrial aumenta al -

máximo y las pérdidas, por efecto de Joule, se reducen al mínimo cuando los capacitores se instalan en un punto inmediato a la carga que consume esta potencia reactiva.

Sin embargo, no obstante que los máximos beneficios de operación son obtenidos cuando los capacitores son localizados en la carga, es generalmente no práctico ó económico localizarlos en cada una de las mismas.

La mayoría de las plantas industriales contienen un gran número de diversas cargas pequeñas, y en vista de que los capacitores son fabricados en capacidades standard, es imposible aplicar los KVAR calculados necesarios a cada una de estas cargas. Así mismo generalmente, todas las cargas no son conectadas a un mismo tiempo, existiendo así un factor de diversidad ó de utilización que varia entre el 40 y 60% regularmente, con lo cual la conexión de un grupo de capacitores en los buses generales de alimentación con un valor tal que compense la carga utilizada (promedio) daran el mismo resultado que si se compensa individualmente.

Las tensiones de operación tambien tienen influencia en las consideraciones económicas asociadas a la localización de capacitores.

Bajo el punto de vista económico la instalación de un banco de capacitores fijo en el caso de alta tensión, suele resultar mas económico, debido a que los capacitores resultan ser mas baratos a medida que su voltaje de operación aumenta para un mismo valor de KVAR nominales. Sin embargo en la industria el atractivo de esta economía se ve reducido debido a riesgos de falla del capacitor que al producirse afectarían a toda la instalación eléctrica de la industria ocasionando en el mejor de los casos operar con bajo factor de potencia durante el tiempo de la localización y reparación de la anomalia; esto sin contar el equipo y el montaje especial que se requiere para trabajar con alta tensión.

La figura (4.21) muestra la localización general de cuatro puntos para la conexión de capacitores.

La localización mas efectiva es en la carga mostrada en C_1 : luego C_2 , C_3 y por último la localización en alta tensión indicada por C_4 .

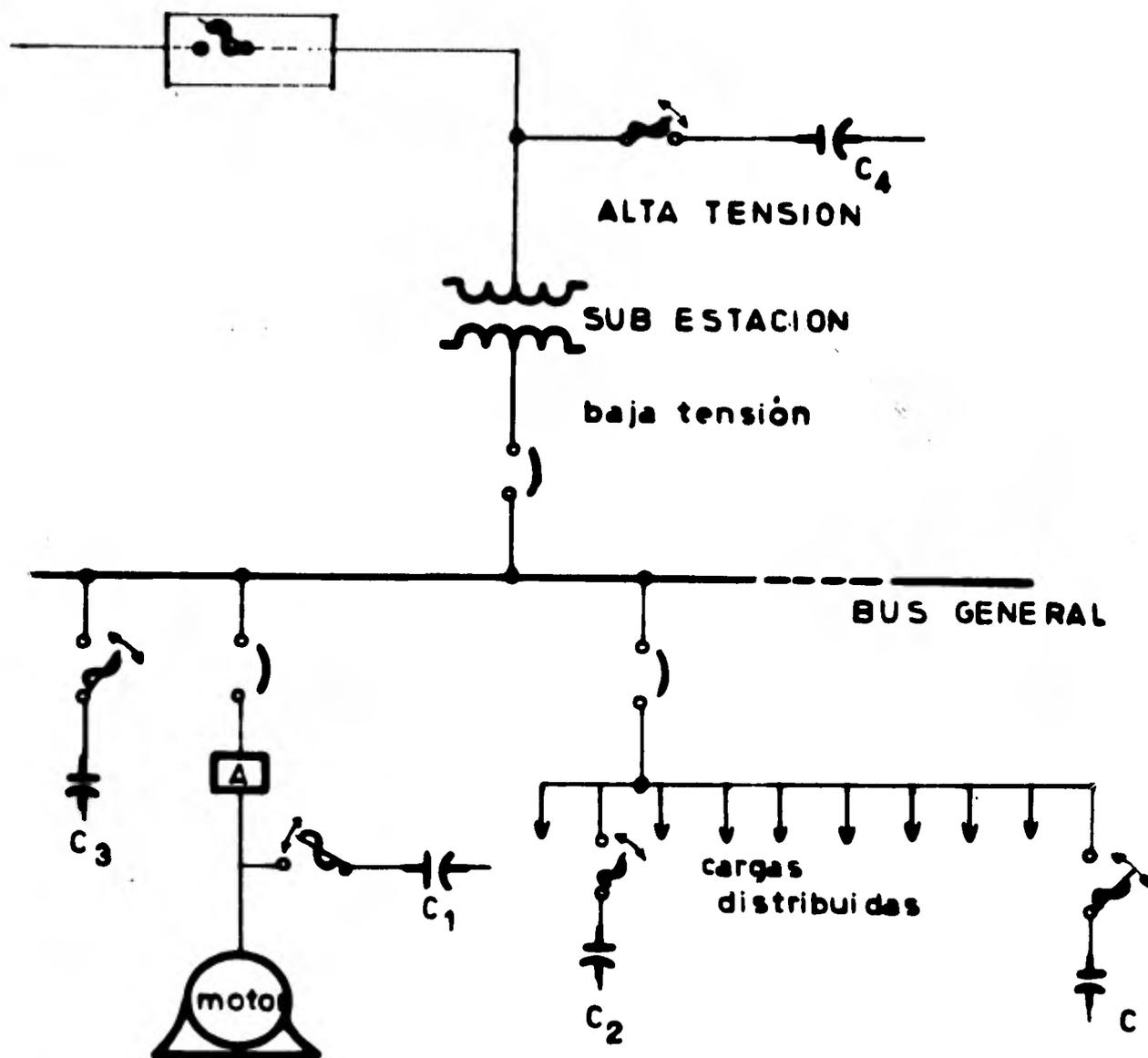


FIG. (4.21) POSICIONES GENERALES PARA LA LOCALIZACIÓN Y CONEXION DE CAPACITORES.

En la figura (4.22) se advierten las ventajas de instalar los capacitores lo mas cercanamente posible a la carga. Notese la reducci3n progresiva, en eficiencia de correcci3n, conforme el punto de instalaci3n de los capacitores se aleja de la carga -- (que ocasiona el bajo factor de potencia).

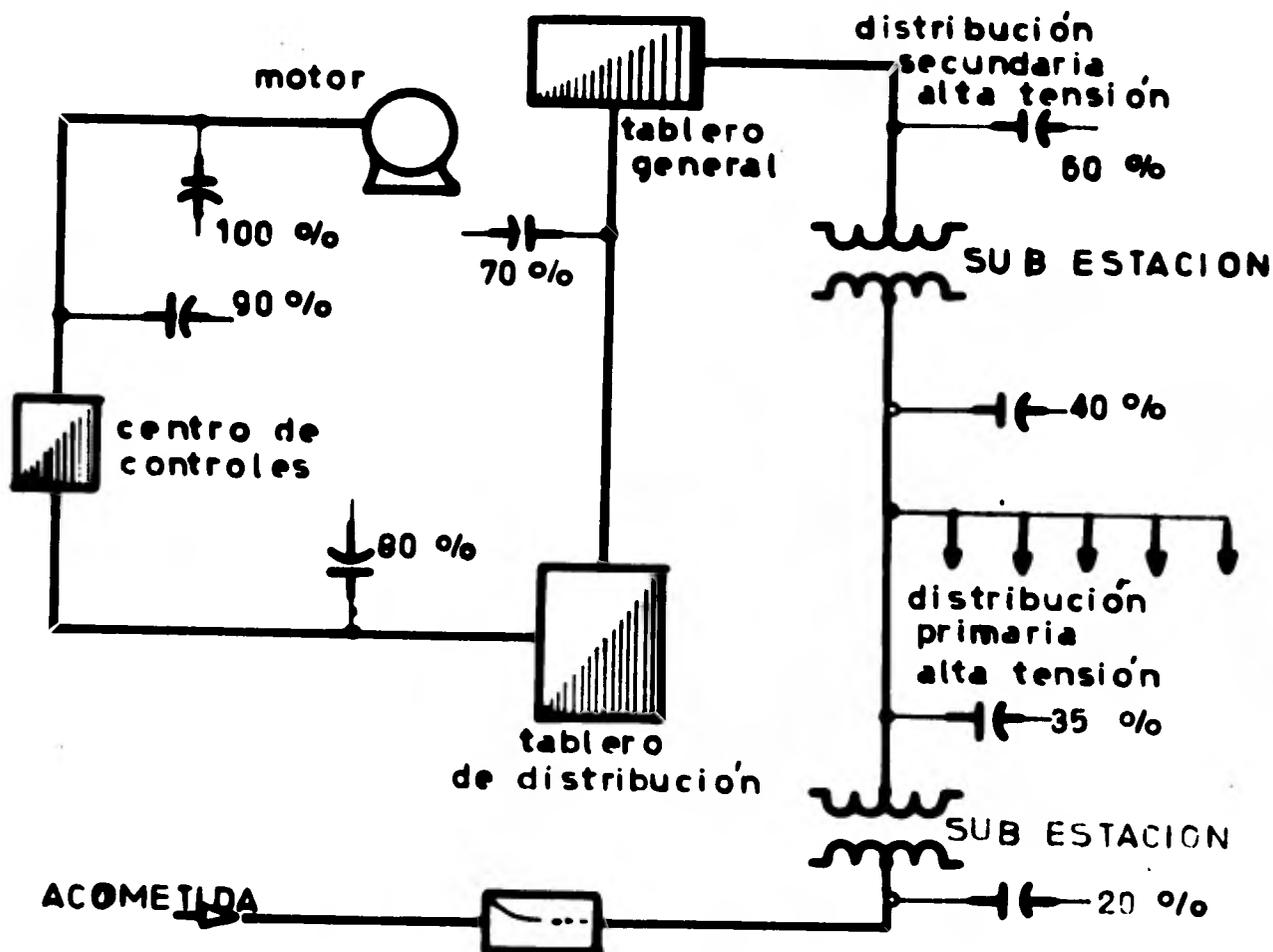


FIG. (4.22)

En sistemas hasta de 600 volts los capacitores se deber3n instalar en la carga, o tan cerca de la carga como sea posible, en orden de obtener el m3nimo costo y el m3ximo beneficio o beneficios adicionales.

Además, al instalar los capacitores en el lado de baja tensión, no solo se consigue descargar los alimentadores sino que se libera una capacidad adicional en los transformadores e interruptores que puede ser aprovechada para conectar otras cargas.

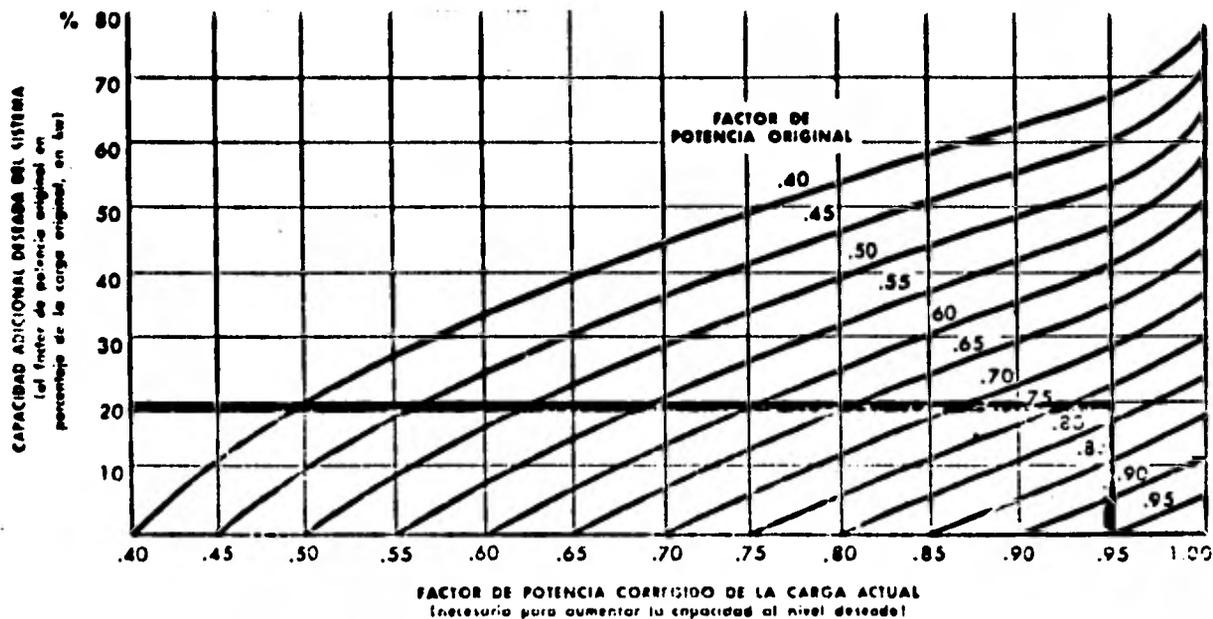


TABLA (4,D)

Cuando se quiere corregir el factor de potencia, para evitar el pago de la penalidad aplicada por las compañías eléctricas, deben instalarse los capacitores detrás del equipo medidor de la energía eléctrica, de modo que la corriente reactiva que circula entre los capacitores y la carga industrial no fluya a través de dicho equipo. Así cuando el equipo medidor se encuentre instalado en el lado de baja tensión, los capacitores deben ser instalados también en baja tensión.

Cuando se quieren disminuir las pérdidas por efecto de Joule en una instalación industrial, los capacitores deben instalarse junto a las cargas principales de manera que eviten el paso de corrientes inductivas, por el cableado constituido por los alimentadores de dichas cargas.

3.3) APLICACION DE ALTERNATIVAS

Con objeto de ubicarnos en cuanto a la utilización de las alternativas es importante hacer notar que no existe una regla a seguir para cada problema particular que se presente en las industrias, la única recomendación que se puede hacer es normar el criterio de corrección que se utilice conforme a los objetivos que se persiguen valiéndose de un análisis particular del caso.

A continuación se resuelven algunos ejemplos mostrándose criterios básicos comunes a seguir para proceder a elevar el bajo f.p. en instalaciones eléctricas típicas de las industrias.

E.1) CARGA CASI CONSTANTE.

La siguiente figura (4.23) muestra el comportamiento de la demanda de energía diaria en una planta industrial. La gráfica puede ser determinada con los procedimientos expuestos en el capítulo III.

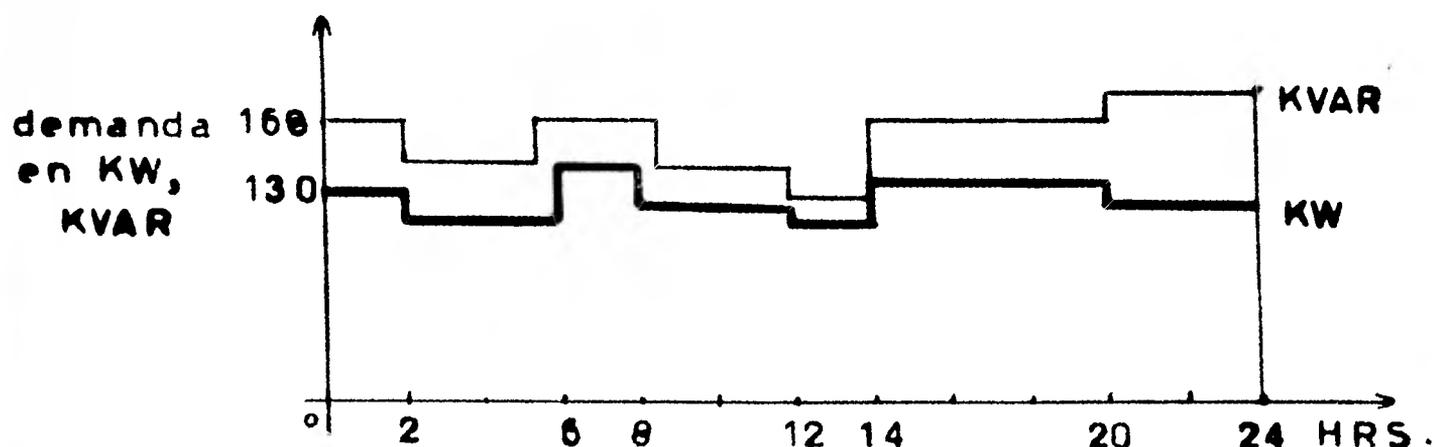


FIG. (4.23)

Durante el periodo de un mes las lecturas de los medidores de la Compañía suministradora de energía eléctrica, indicadas en su factura fueron:

KWH	=	93,300
KVARH	=	120,200
f.p.	=	0.612
Facturación por el consumo		\$ 33,600.00
Facturación total		\$ 43,922.00

El bajo f.p. registrado (f.p.₁) se tradujo en una penalidad de sobrecargo de \$ 10,322.00, por lo que la empresa afectada, con el fin de evitarsela en lo sucesivo, decidió instalar capacitores de potencia para alcanzar un mínimo f.p.₂ 0.85.

Para determinar la cantidad de kilovolts-amperes-capacitivos (KVARC) necesarios, se utiliza la expresión 4.6 para lo cual se calculan primero los datos:

$$\begin{aligned}\tan \theta_1 &= \tan (\cos^{-1} 0.85) \\ &= 1.3 \\ \tan \theta_2 &= \tan (\cos^{-1} 0.85) \\ &= 0.62\end{aligned}$$

De la lectura mensual indicada en la facturación se determinan los KW (mensuales) considerando una demanda constante:

$$KW = \frac{KWH}{24 \text{ hrs.} \times 30 \text{ días}} = \frac{93,300 \times 30}{720} = 130$$

Sustituyendo en la expresión (4.6)

$$\begin{aligned}KVARC &= 130 (1.3 - 0.62) \\ &= 88.4\end{aligned}$$

E.1A) OPCION DE INSTALACION EN ALTA TENSION.

Esta opción contempla la corrección global de toda la instalación eléctrica utilizando un solo banco formado por 3 capacitores monofásicos de 30 KVARC cada uno. Estos se conectarían después del equipo de medición (ver figura 4.24). El costo de materiales e instalación sería aproximadamente el siguiente:

Costo por KVARC = \$ 100.00
 Costo de capacitores 90 x 100 = \$ 9,000.00
 Costo de equipos de protección y conexión = \$ 4,000.00
 Costo de instalación y accesorios = \$ 7,000.00
 Inversión total de la opción = \$ 20,000.00

E.1B) OPCION DE INSTALACION EN BAJA TENSION

En esta opción se pueden utilizar una o varias unidades trifásicas conectadas en el lado de baja tensión del transformador T_1 , logrando con esto todas las ventajas que nos brinda el operar -- con un buen factor de potencia o sea:

- a) Se logra aumentar la capacidad del sistema para manejar potencia activa.

KVA'S disponibles a $fp = 0.61 = 12$ KVA'S

KVA'S disponibles a $fp = 0.85 = 66$ KVA'S

- b) Se disminuyen las pérdidas por "Efecto Joule" al conectar los capacitores cerca de las cargas.

- c) Mejoramos la regulación de voltajes.

Con respecto a la instalación en A.T. se tiene la ventaja de que en caso de alguna falla en los capacitores no afectamos a toda la instalación y además el mantenimiento es de menor costo y más fácil de realizar.

El costo de materiales e instalación en B.T. sería aproximadamente:

Costo por KVARC	\$ 300.00	
Costo total de 90 KVARC		\$ 27,000.00
Costo equipo de protección y conexión	\$ 4,000.00	
Costo instalación y accesorios	\$ 2,000.00	
Inversión total de la opción	\$ 33,000.00	

Comparando las bondades de cada una de las opciones es fácil, a nivel industrial, inclinarnos por la segunda, ya que independientemente de otras ventajas, en la industria lo que no se tolera es la interrupción del servicio de energía eléctrica y cualquier circunstancia que exponga su continuidad debe ser evitada.

La inversión realizada en esta segunda opción se amortizaría en un tiempo dado por el cociente:

$$\frac{\text{inversión realizada}}{\text{sobrefacturación mensual}} = \frac{33,000.00}{10,322.00} = 3.2 \text{ meses.}$$

En realidad los tiempos de recuperación de la inversión es capacitores de potencia, son cortos aún escogiendo la opción supuestamente menos económica.

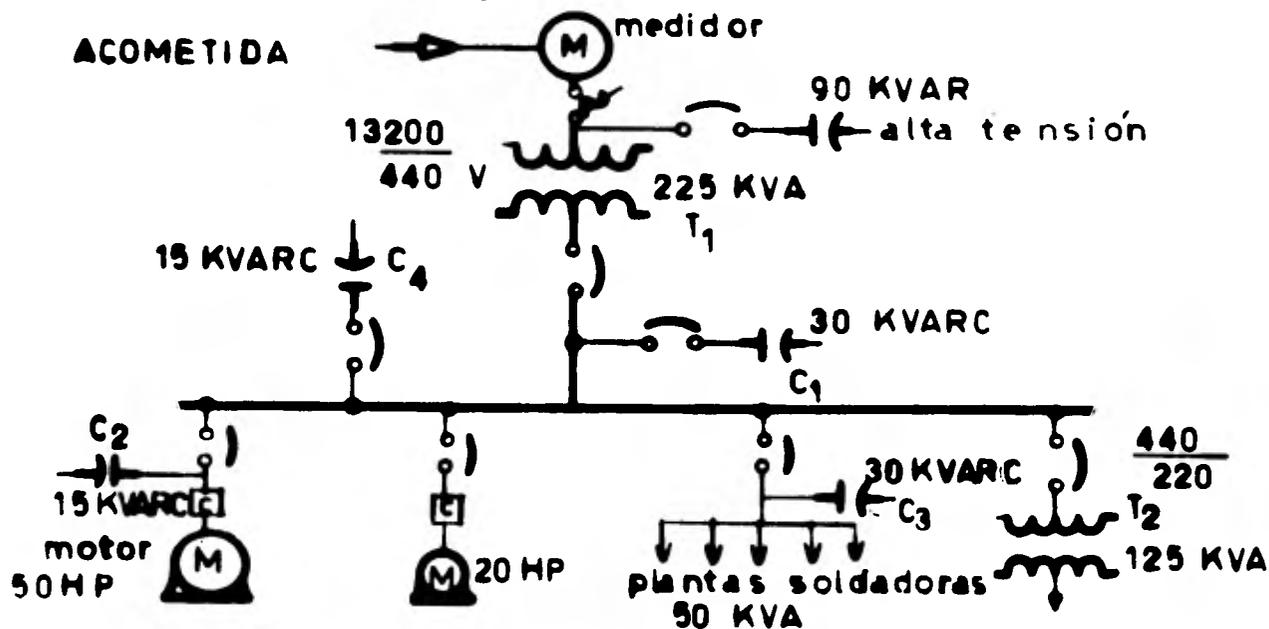


FIG. (4.24) DIAGRAMA UNIFILAR (EJEMPLO E.1)

Dadas las características del sistema (fig. 4.24), la ubicación de cada uno de los capacitores se hace de acuerdo con el siguiente criterio.

El capacitor C_1 se colocó en el secundario del transformador, para compensar las corrientes reactivas del mismo, cuando éste se queda trabajando casi en vacío, observese que el valor de los KVARC no sobrepase el 20% de la capacidad nominal del transformador T_1 . Los capacitores C_2 y C_3 compensan cargas inductivas ubicándose las mas cerca de ellas. El capacitor C_4 compensa cargas restantes conectadas al bus general de alimentación.

E.2) CARGA VARIABLE

Considerese el caso de una industria con un comportamiento típico de demanda variable de energía eléctrica diaria, correspondiente en la fig. (4.25) y en la tabla (4.E).

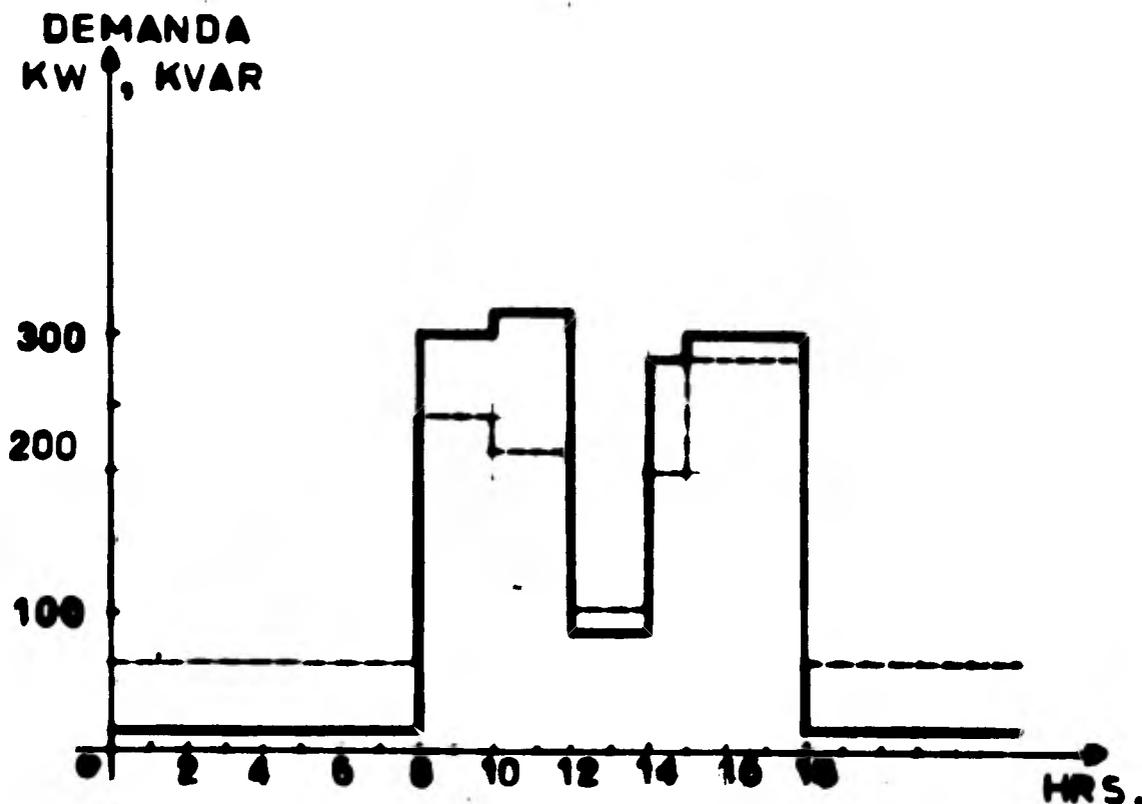


FIG. (4.25) CURVAS DE DEMANDA KW Y KVAR (E.2)

De acuerdo con la gráfica se tienen los siguientes datos:

Consumo diario: 2,860 KWH
3,180 KVAR

Los recibos mensuales de la compañía suministradora muestran los datos:

Consumo mensual: 85,800 KWH
95,400 KVARH
f.p. = 0.67

Facturación por consumo:	\$ 30,888.00
Total	\$ 40,392.00
Sobrefacturación por bajo f.p.	\$ 9,504.00

Como se puede apreciar en la figura (4.25), este tipo de instalaciones industriales no operan con un proceso continuo de producciones ya que el grueso de la demanda de energía se presenta durante las horas del día.

Para efecto de calcular los KVARC que se requieren para elevar el bajo f.p. a un valor mínimo de 0.85, dadas las características de la variación de la carga, no es conveniente utilizar directamente la expresión (4.6) $[KVARC = KW (\tan \theta_2 - \tan \theta_1)]$ ya que se tiene la problemática de que los KW y θ_1 no presentan un valor que pueda considerarse constante, sin embargo se mostrarán procedimientos a seguir para encontrar una solución exacta y/o aproximada a este tipo de situaciones para después aplicar una compensación en grupo y/o individual.

E.2.A) SOLUCION EXACTA

El procedimiento consiste en dividir la gráfica (4.25) en intervalos de tiempo en los que la demanda se mantenga casi constante; determinar una compensación parcial para cada intervalo e integrarlos respecto al tiempo para obtener una compensación global-

TABLA 4.E

LECTURAS DEL COMPORTAMIENTO DE LA DEMANDA DE ENERGIA (EJEM. E.2)

1 PERIODO DE CONSUMO (HRS.)	2 HORAS	3 KW	4 KVARL	5 KWH	6 KVARH	7 * COS θ_1	8 tan θ_1
DE 0 - 8	8	20	70	160	560	0.275	3.496
DE 8 - 10	2	300	240	600	480	0.780	0.802
DE 10 - 12	2	320	220	640	440	0.820	0.698
DE 12 - 14	2	80	120	160	240	0.560	1.479
DE 14 - 15	1	280	200	280	200	0.813	0.716
DE 15 - 18	3	300	280	900	840	0.730	0.936
DE 18 - 24	6	20	70	120	420	0.275	3.496

$$* \cos \theta_1 = \frac{KW}{\sqrt{KW^2 + KVAR_L^2}}$$

de reactivos diarios. Realizando el análisis mencionado se obtendrá la tabla (4.F) en la cual se anotan todos los datos necesarios, las operaciones realizadas y los resultados parciales, dando una visión clara de los flujos de energía reactiva dentro del sistema, antes y después de la compensación.

La columna número tres del análisis (tabla 4.F) se obtiene calculando los KVARC necesarios para obtener un $f.p. = 0.85$ durante el intervalo de tiempo en cuestión, basándose en los datos de las columnas 3 y 8 de la tabla (4.E) y utilizando la expresión (4.6).

La suma de los parciales de la columna número cuatro representa la integración de energía reactiva capacitiva que se requiere durante las veinticuatro horas del día para obtener un $f.p.$ promedio de 0.85 o sea 1,406.13 KVARHC; de este valor se obtienen los KVARC que deberán suministrarse al sistema, o sea:

$$\begin{aligned} \text{KVARC}_s &= \frac{\text{KVARHC}}{24 \text{ H}} \\ &= \frac{1406.13}{24} \\ &= 58.58 \text{ KVARC} \end{aligned}$$

A partir de este valor se obtienen las columnas 5, 6, 7, 9 y 10 que vienen a ser una comprobación del resultado obtenido.

Es decir, manteniendo un suministro de 58.58 KVARC al sistema, se asegura una lectura del $f.p.$ en los medidores de la compañía suministradora igual a 0.85, promedio al mes.

- UBICACION DE LOS REACTIVOS CAPACITIVOS.

Como se indicó en el ejemplo (E.1) anterior la compensación en alta T. se logra instalando el total de los reactivos capacitivos, en forma de bancos monofásicos de capacitores, después del equipo de medición, ubicado en el lado de alta tensión de la --

TABLA (4.F)

ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA ENERGIA REACTIVA EN EL PROCESO DE COMPENSACION
(EJEMPLO E.2)

INTERVALO DE CONSUMO (HRS)	f.p. ANTES DE COMPENSAR. f.p.I	COMPENSACION PARCIAL NECESARIA (f.p.2=0.85) KVARC _n	INTEGRACION PARCIAL DE (KVARC _{xt}) KVARHC ⁿ	ENERGIA REACTIVA SUMINISTRADA (KVARC _{sxt}) KVARHC _s	DIFERENCIA (KVARHC _s - KVARHC _n)	f.p. CORREGIDO (APLICANDO KVARHC _s) f.p.II	POTENCIA REACTIVA DEMANDADA. KVARL	DIFERENCIA (KVARL - KVARC _s)	DEMANDA DE ENERGIA REACTIVA RESULTANTE (KVARL - KVARC _s) xT KVARH
QT ₁ (18-8)	0.27	57.00	798.00	820.12	+22.12	0.868	70.00	11.42	159.88
QT ₂ (8-10)	0.78	54.60	109.20	117.16	+ 7.96	0.855	240.00	181.42	362.84
QT ₃ (10-12)	0.82	24.96	49.92	117.16	+67.24	0.892	220.00	161.42	122.84
QT ₄ (12-14)	0.56	68.75	137.50	117.16	-20.34	0.793	120.00	61.42	322.84
QT ₅ (14-15)	0.813	26.93	26.93	58.58	+31.65	0.892	200.00	141.42	141.42
QT ₆ (15-18)	0.73	94.86	284.58	175.74	-108.84	0.804	280.00	221.42	664.26

Σ1406.13

Σ1406.13

Σ ≈ 0

Σ1774.

subestación eléctrica; en éste caso, dada la discontinuidad de - operación de esta planta, esta opción es menos riesgosa (tomando en cuenta las pérdidas económicas viables, en caso de falla de - los capacitores), pero esta alternativa, dadas las ventajas técnicas que se tienen al compensar en baja tensión y el corto plazo de la amortización, la opción de ubicarlos en alta tensión se -- puede desechar sin ninguna inconveniencia notable.

De acuerdo al análisis de la tabla (4.F) se deduce que la compensación en todo momento debe ser de $58.58 \approx 60$ KVARC constantes.

La manera mas conveniente y práctica lograrlo es conectando los capacitores de acuerdo como se muestra en la figura (4.26) considerando a los capacitores $C_1 = 30$ KVARC y $C_2 = 30$ KVARC compensando a cada uno de los centros de control de motores (CCM).

Costo y amortización de la opción escogida:

Costo capacitores = 60 KVARC x \$ 300.00	\$ 18,000.00
Costo equipo de protección y desconexión	\$ 3,000.00
Costo instalación y accesorios	\$ <u>2,000.00</u>
Total de la inversión	\$ 23,000.00

$$\text{Amortización} = \frac{23,000}{9,804} = 2.42 \text{ meses}$$

Una tercera opción seria la compensación mixta. En este tipo de compensación se procura mantener el f.p. lo más próximo a la unidad, tratando de obtener todas las ventajas de la corrección de f.p. (reducción de pérdidas por E. Joule, regulación del voltaje etc.). Para ello se considera conveniente compensar individualmente el horno de inducción (H_1) y el motor de 100 H.P. (M_1) Cabe hacer notar que en este caso, estos aparatos eléctricos no son operados simultaneamente, operan en forma alternada por necesidades del proceso de producción. Es por esto que a cada uno de ellos se les conectara un capacitor adicional, C_H y C_m respectivamente y con un valor de 15 KVARC cada uno, utilizando el

centro de
CCM : control de
motores

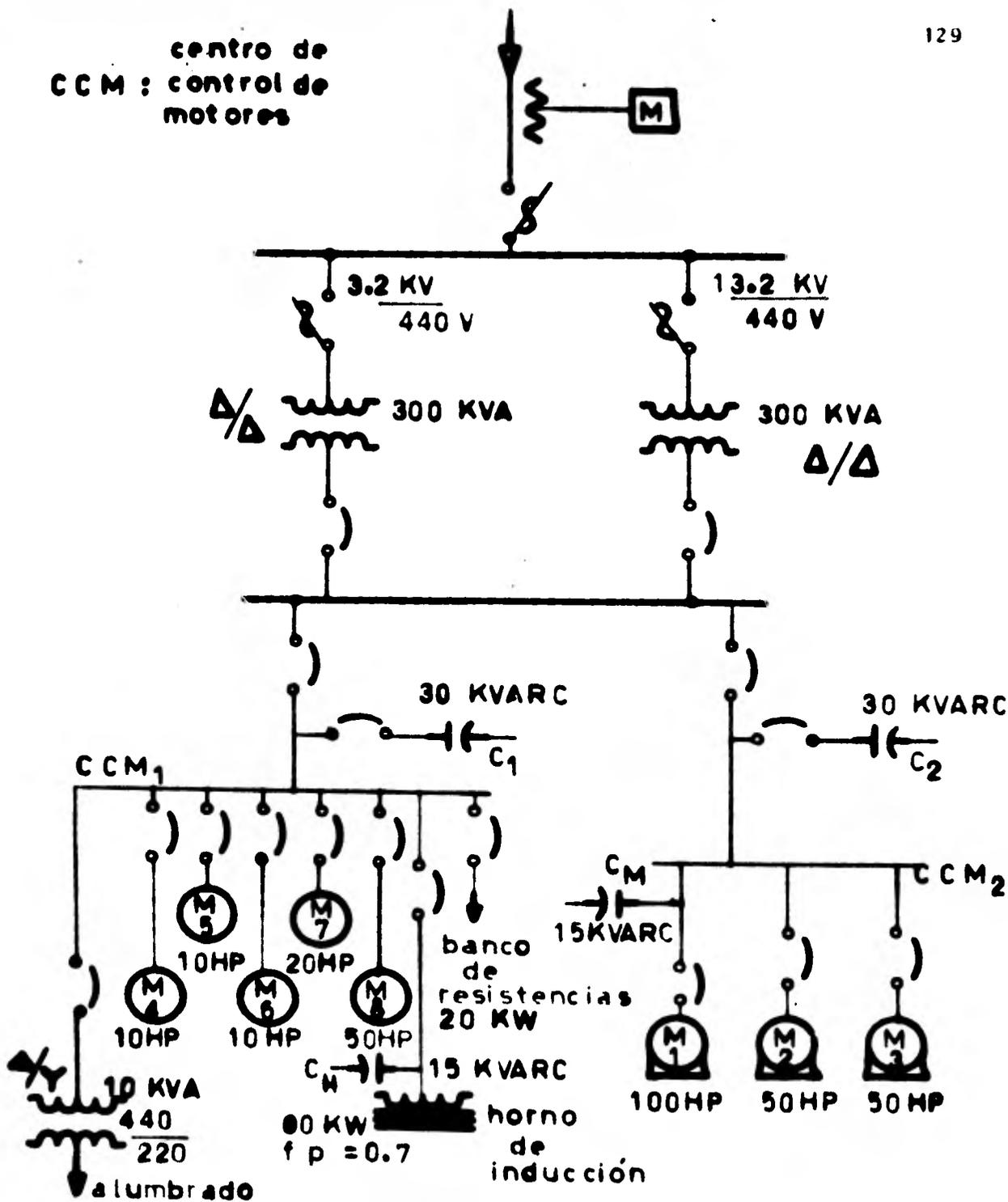


FIG. (4.26) DIAGRAMA UNIFILAR EJEMPLO (E.2).

mismo medio de conexión y desconexión de los aparatos compensados. Esta medida elevará el f.p. a un valor cercano al 90% pero a la larga brinda más beneficios.

Obteniendo el costo aproximado de esta opción:

Costo de capacitores - 90 KVARC x \$ 300.00	\$ 27,000.00
Costo de equipo de protección y desconexión	\$ 3,000.00
Costo Instalación y accesorios	\$ <u>2,000.00</u>
Costo total de la inversión	\$ 32,000.00

$$\text{Amortización} = \frac{32,000.00}{9,504.00} = 3.4 \text{ meses}$$

Considerando las ventajas que se obtienen con esta última opción, desde el punto de vista operativo, resulta ser la mejor a pesar de requerir una mayor inversión inicial, ya que a la larga redituará en mayores beneficios.

METODOS APROXIMADOS

El análisis hecho en el ejemplo anterior nos da, además de el valor justo de los capacitores necesarios una visión muy clara del proceso de corrección, pero en la mayoría de los casos que se presentan en las industrias se carece de los datos exactos de la variación de cargas. Cuando no se dispone del tiempo necesario para obtener los datos, el método aproximado da generalmente una buena aproximación y se obtiene un factor de seguridad, de 10 al 20% arriba. Este método aproximado consiste en lo siguiente:

1. Se obtienen de la compañía de Luz las hojas de lectura mensual, de tres meses anteriores como mínimo.
2. Se promedian los consumos en KWH y KVARH y las demandas máximas en KW.
3. Se dividen los KWH y los KVARH, entre las horas de trabajo,-

durante el mes, obteniéndose así las demandas medias en KW y KVAR.

4. Se calcula el $\cos \theta$, (actual) con la fórmula

$$\cos \theta_1 = \frac{KW}{\sqrt{KW^2 + KVAR^2}}$$

de donde se deduce:

$$t_g \theta_1 = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \theta_1}}{\cos \theta_1}$$

5. Se fija el $\cos \theta_2$ (deseado)
6. Se calculan los KVARC que hay que agregar al sistema, por medio de la fórmula $KVARC = KW [t_g \theta_1 - t_g \theta_2]$.
7. Se elijen los capacitores comerciales más próximos a la capacidad anteriormente calculada y se aplican en los lugares -- que se sepa dan origen a los KVAR.

E.3) Ejemplo:

Consideremos una fábrica que trabaja 240 horas/mes.

1. Las lecturas de los recibos de la compañía de Luz arrojan -- los siguientes datos:

	KWH	KVARH	D. MAX
Marzo 1979	74500	83000	420
Abril 1979	52000	64000	290
Mayo 1979	<u>85000</u>	<u>102300</u>	<u>480</u>
	211500	249300	1190

2. Promedios: 70500 KWH; 83100 KVARH; 397 KW

3. Demandas medias: $\frac{70500}{240} = 293$ KW; $\frac{83100}{240} = 347$ KVAR

4. Factor de potencia inicial:

$$\cos \theta_1 = \frac{293}{\sqrt{293^2 + 347^2}} = 0.65$$

$$t_g \theta_1 = 1.17$$

5. Factor de potencia a CORREGIR

$$\cos \theta_2 = 0.85$$

$$t_g \theta_2 = 0.61$$

6. Cálculo de los KVARC

$$\text{KVARC} = 293 \times (1.17 - 0.61) = 164$$

7. Localización de los capacitores.

Se ha decidido colocarlos en el lado de baja tensión los lugares - y los capacitores serán:

3 de 30 KVAR para la Subestación de 450 KVA

1 de 15 KVAR para un motor de 75 HP.

2 de 15 KVAR para un alimentador de soldadores

1 de 30 KVAR para un alimentador de soldaduras

Ver figura 4.27.

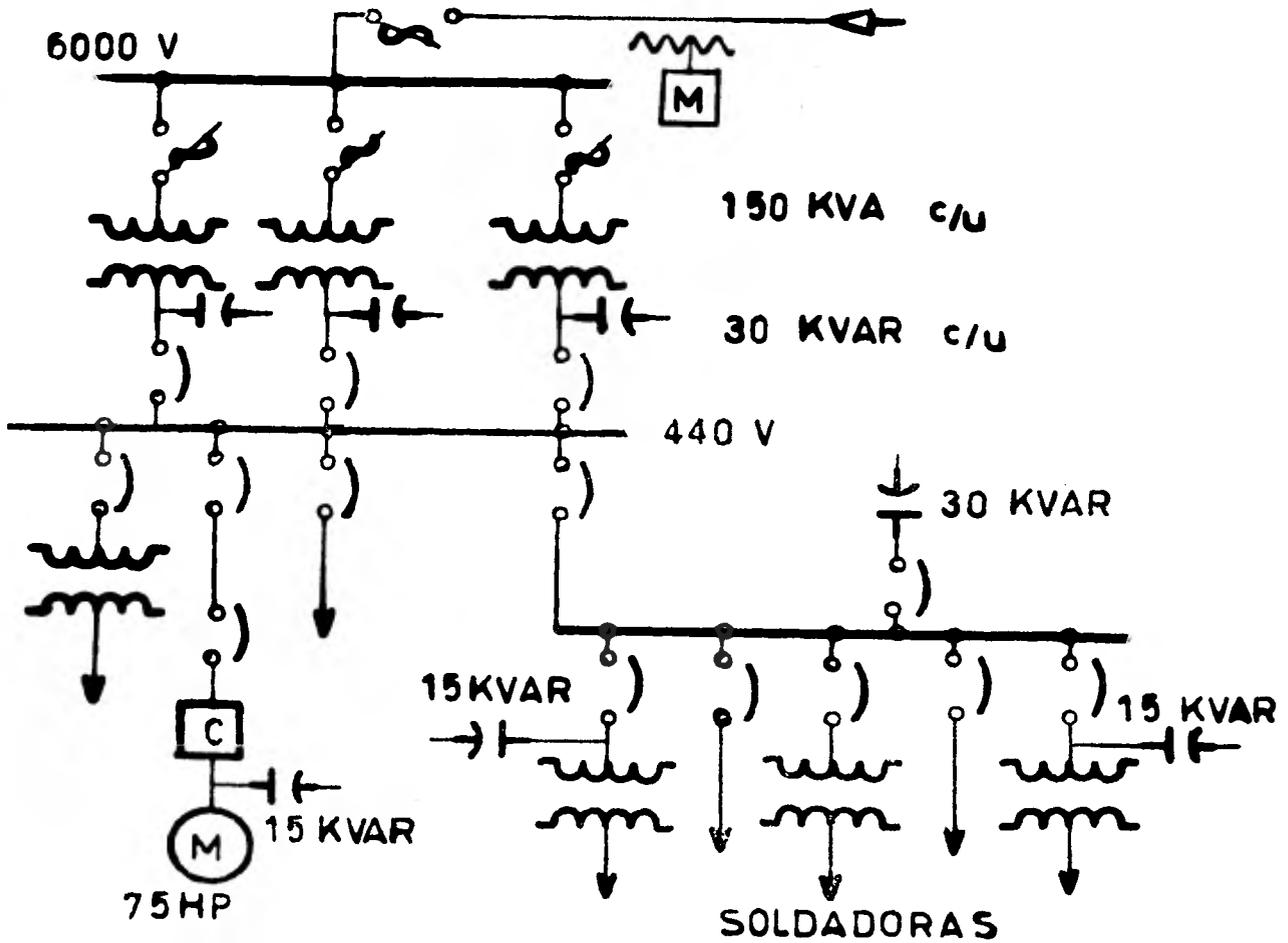


FIGURA (4.27) DIAGRAMA UNIFILAR (EJEMPLO E.3)

Un procedimiento rapido para obtener los KVARC cuando se quiere corregir el f.p. a 0.85, a partir de las demandas medias: KW y KVAR, es empleando la formula $KVARC = KVAR - 0.62 KW \dots\dots\dots$ que se obtiene de:

$$0.85 = \frac{100}{\sqrt{100^2 + x^2}} \tag{4.20}$$

$$x = 62 \text{ KVAR}/100 \text{ KW}$$

En el ejemplo:

$$KVARC = 347 - 0.62 \times 293 = 164$$

En la figura (4.28) se ha elaborado un nomograma para el cálculo -

de los KVARC en base a un factor de potencia mejorado a 0.85.

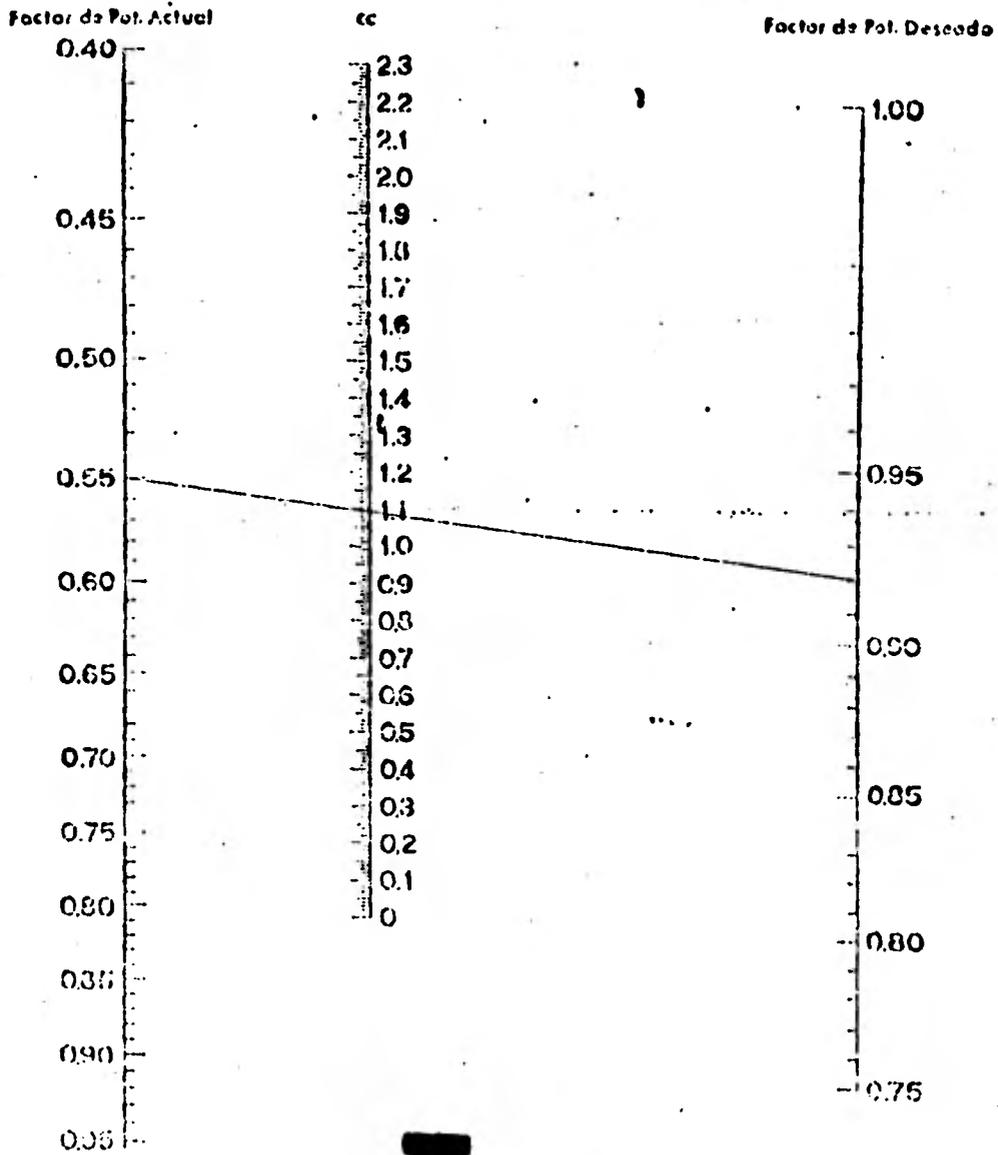


FIGURA (4.28)

3.4) CONSIDERACIONES PARA LA INSTALACION DE CAPACITORES EN BAJA TENSION.

El pequeño tamaño de las unidades de los capacitores facilita el encontrar el lugar apropiado para ellos; directamente en el paquete de un equipo, en el piso, sobre un muro, en una columna ó bien junto a los tableros de control del equipo. Sin embargo cuando la instalación de éstos capacitores no es posible junto al equipo por corregirse debe considerarse el montaje en bancos junto a los tableros de distribución de carga, particularmente en aquellos casos de grupos de motores pequeños conectados a circuitos derivados.

INSTALACION ELECTRICA DE CAPACITORES EN BAJA TENSION

Los capacitores de potencia para baja tensión se encuentran en el mercado en forma de unidades trifásicas con un voltaje nominal -- que oscila entre los 216 y 600 volts. De entre estos se consideran como voltajes standard los siguientes:

240 volts
480 volts
600 volts

La potencia de éstas unidades suele variar según el rango de valores, comprendidos normalmente, entre 6 y 48 KVAR. El uso de unidades monofásicas fabricados para las mismas tensiones y potencias reactivas que las trifásicas es menos común.

Generalmente las unidades trifásicas traen de fábrica una conexión (interna) en delta, interpretandose su tensión entre fases de dicha delta como la tensión nominal de la unidad.

Cuando se utilizan unidades monofásicas también se conectan en delta instalándose en bancos de tres unidades o un múltiplo de tres.

La razón para llevar a cabo la conexión en delta se debe a consideraciones económicas, ya que las mayores tensiones aplicadas en la-

conexión delta significan una sensible disminución del costo de los capacitores.

Por ejemplo:

Un capacitor a 240 volts cuesta un 67% más que uno de la misma potencia pero a 480 volts.

En baja tensión, la tensión nominal de los capacitores es algo -- más alta que el voltaje nominal de la línea a que van a ser conec tados.

Esto es para prevenir las elevaciones en el voltaje que pueden -- producirse al desconectar los capacitores en paralelo con moto-- res de inducción, especialmente en los casos en que la potencia - reactiva del banco de capacitores instalado sea superior a la ade cuada.

Otra razón primordial es la de prevenir la elevación local del -- voltaje, ocasionada por los mismos capacitores en su punto de ins talación y las posibles fluctuaciones del voltaje de línea, así - como la disminución de la capacidad nominal del capacitor.

Los capacitores de potencia para baja tensión se conectan siempre en paralelo entre sí cuando una sola unidad trifásica o tres mono fásicas, no son suficientes para obtener la potencia reactiva de-- seada. El banco de capacitores así formado se conecta a su vez - er. paralelo con la carga a corregir. Físicamente los capacitores se colocan en hileras, formando un agrupamiento compacto, pero -- respetándose las distancias mínimas entre unidades que recomienda el fabricante.

Para la elección de los conductores alimentadores y elementos de-- conexión, desconexión y protección, se debe considerar que el ca-- pacitor siempre trabaje al 100% de su capacidad.

Si Q es la potencia reactiva de un banco de capacitores, expre--

sada en KVAR, y V es su tensión nominal expresado en volts, la corriente nominal por fase del banco viene dada por la expresión:

$$I_n = \frac{Q}{\sqrt{3} V \times 10^{-3}} \quad (4.21)$$

Además se deben tomar en cuenta algunas especificaciones recomendadas por el CONNIE entre las cuales mencionamos las siguientes:

- 1) La máxima sobre-corriente que en forma continua deben soportar los capacitores, a voltaje nominal y frecuencia nominal, es el 15% por encima de la corriente nominal del banco de capacitores.
- 2) La corriente nominal del cableado, equipos de conexión y desconexión, cuchillas desconectadoras, etc., debe ser, como mínimo el 135% de la corriente nominal del banco, con excepción de los fusibles de protección, los cuales en general, deben elegirse con una corriente nominal del 165% de la corriente de cada capacitor en caso de protección individual, o de la corriente nominal del banco en caso de protección en grupo.
- 3) Para la protección de capacitores con interruptores magnéticos o termomagnéticos debe de considerarse una corriente nominal a un 135% de la corriente nominal de los capacitores.
- 4) Para la protección individual del capacitor trifásico es práctica común el instalar dos fusibles en dos bornes cualesquiera del capacitor dejando sin fusible la tercera fase.
- 5) Al instalar un grupo de capacitores debe instalarse un fusible en cada fase para prevenir posibles corto-circuitos de fase a tierra. Existen en el mercado capacitores de potencia con fusibles internos instalados por el fabricante; en este caso pueden suprimirse los fusibles externos dedicados a la protección individual.

- 6) En baja tensión los capacitores de potencia suelen llevar resistencias de descarga internas, asegurando que el voltaje entre bornes baja a menos de 50 volts durante un minuto-después de haber sido des-energizado el capacitor. Si un capacitor no llevase instaladas éstas resistencias internas es necesario proveer la instalación de resistencias externas equivalentes ó asegurarse de que el capacitor va a funcionar en paralelo con el embobinado de un motor, un transformador ó algun otro equipo análogo, a través del cual pueda descargarse con una velocidad adecuada al quedar des-energizado.
- 7) En aplicaciones especiales tales como la corrección del f.p. en motores para grúas ó elevadores, bancos de secciones desconectables que entran y salen rápidamente de operación, etc., es posible que haya que volver a energizar un capacitor pocos segundos después de haber sido desenergizado. En estos casos debe proveerse la instalación de resistencias de descarga rápida.
- El volver a conectar un capacitor que todavía está cargado puede ser peligroso para el equipo de conexión e incluso para el mismo capacitor.
- 8) Al instalar bancos fijos, es decir, bancos de capacitores que van a quedar conectados permanentemente a la línea debe planearse la instalación de cuchillas desconectoras que, independientemente de que tengan o no capacidad para desconectar el banco de capacitores con carga, permitan que éste pueda quedar desenergizado durante las operaciones de mantenimiento sin que sea necesario paralizar el resto de la instalación eléctrica.
- 9) Al instalar bancos desconectables, bancos que van a entrar y salir de operación con cierta frecuencia, operados por medio de un control automático ó manual debe proveerse también la instalación de cuchillas desconectoras que permi-

tan dejar desenergizado, tanto el banco de capacitores, como los contactores con los que se efectúan las operaciones normales de conexión y desconexión.

- 10) El alambrado de un banco de capacitores debe diseñarse de manera que las unidades que lo componen sean fácilmente desconectables y reemplazables,

Todas estas recomendaciones están encaminadas a simplificar al máximo las operaciones de mantenimiento y no entorpecer la continuidad en el funcionamiento del sistema eléctrico al que se va a conectar dicho banco de capacitores.

Dependiendo del lugar de instalación, un banco de capacitores para baja tensión puede utilizarse para uso interior o para intemperie.

La diferencia entre unos y otros estriba en que los capacitores para uso en intemperie se diseñan para soportar condiciones más adversas tanto del tipo físico como eléctrico.

Así por ejemplo soportan mayores sobrecorrientes que los de uso interior, a ello se debe que a los capacitores para uso en intemperie se les exige que su aislamiento soporte 30 KV de nivel básico de impulso.

Los capacitores de potencia son capaces de almacenar una gran cantidad de carga eléctrica a tensiones relativamente altas. Aunque debido al propio diseño de los capacitores, la mayor parte de las líneas del campo eléctrico producidas por dicha carga tienen su origen y terminan en el mismo capacitor, no es posible evitar que también se establezca un campo eléctrico hacia el exterior del tanque y consecuentemente este se convierta en una superficie equipotencial del campo mencionado.

Si el tanque del capacitor se mantiene aislado de tierra puede quedar cargado a un determinado potencial con el peligro de produ

irse una descarga eléctrica si se le toca.

Por lo anterior es conveniente el conectar a tierra los tanques de los capacitores de potencia o bien el bastidor metálico en el cual estén instalados dichos capacitores,

Debe tomarse la precaución de que el alambrado en los bancos de capacitores para baja tensión se lleve a cabo con cable aislado y adecuado a las temperaturas de operación.

De ésta manera el conectar a tierra los tanques no implica el riesgo de que se presenten cortos circuitos de fase a tierra. Además este tipo de corto circuito puede quedar librado con la protección del banco de capacitores.

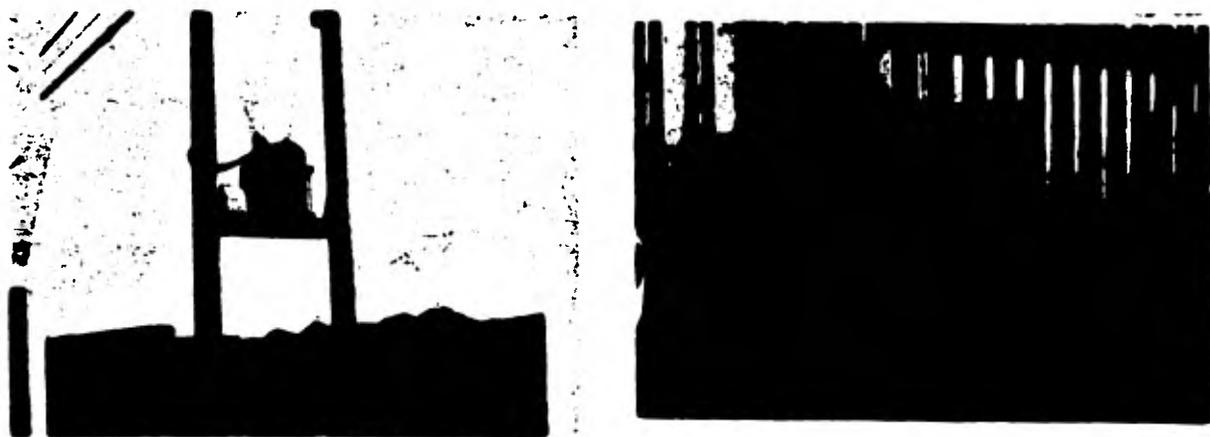


FIGURA (4.29) INSTALACION DE UN CAPACITOR SOBRE BASTIDORES METALICOS.

3.5) CONSIDERACIONES PARA LA INSTALACION DE CAPACITORES EN ALTA TENSION.

Se denominan capacitores de potencia de alta tensión a aquellos - cuya tensión nominal de operación esta entre 2400 y 19920 volts, - (monofásicos) pudiendose utilizar en redes de hasta 34,500 v. Co_nnectandose en estrella. Para voltajes mayores se hacen conexio-- nes serie de 2 ó más capacitores,

Se fabrican en unidades monofásicas de:

25	KVAR
50	KVAR
100	KVAR
150	KVAR
200	KVAR
300	KVAR

y en unidades trifásicas de 300 KVAR.

Las baterías trifásicas de capacitores pueden instalarse conectan_{do} lo tres capacitores (o grupos de capacitores) monofásicos ya sea en delta ó en estrella y en este último caso, con el neutro flo-- tante ó conectado a tierra, La conexión en delta se reduce prác-- ticamente a los bancos instalados a 2,400 v. de tensión nominal.

La elección del sistema de conexión debe basarse solo en la mayor o menor funcionalidad del mismo. Esta funcionalidad puede ser -- analizada desde el punto de vista de la protección del sistema ó desde el de la maniobra del banco.

La protección de los sistemas con capacitores en derivación difie_{re} de la de cualquier otro dispositivo, ya que lo que se busca -- fundamentalmente no es proteger al capacitor de sobrecargas, sino al sistema, de las consecuencias por la puesta en corto circuito-- de un capacitor, evento siempre posible.

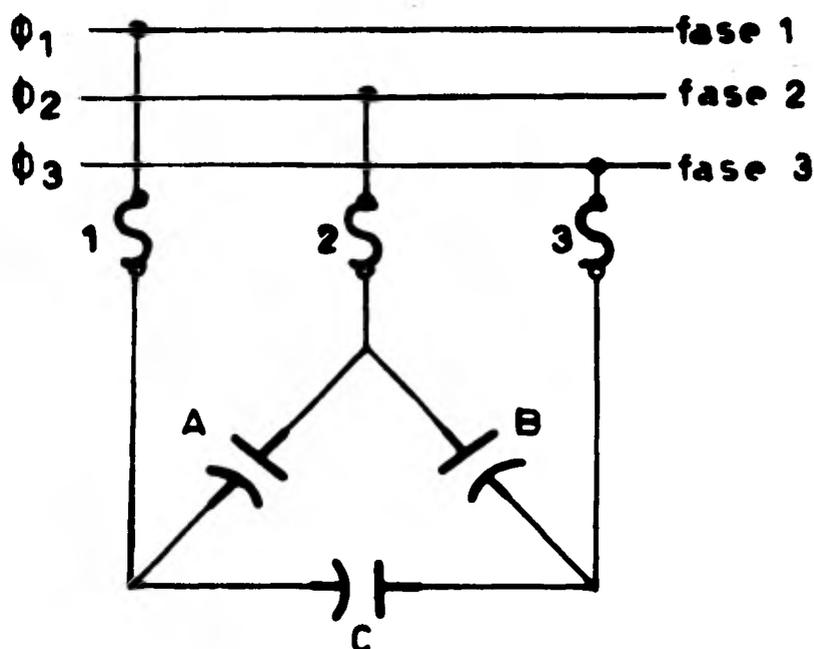


FIGURA (4.30) CONEXION EN DELTA DE CAPACITORES - EN A.T.

Si la batería está conectada en delta como se muestra en la figura (4.30) y se pone en corto circuito uno de los capacitores, el corto-circuito se establece entre dos fases del sistema de distribución.

Por ejemplo:

La falla del capacitor (A) en la figura (4.30) significa un corto circuito entre las fases 1 y 2 cuya potencia queda determinada por la de corto-circuito bifásico del sistema de alimentación en el punto de localización de los capacitores. El corto circuito en el capacitor produce la fusión del fusible 1 ó 2 quedando en servicio solo el capacitor B ó el C. La corriente será nula en una fase y una fracción (57.7%) de la nominal en las otras dos.

La conexión en delta es desechada a menudo por razones de tipo económico. Los capacitores requieren un rango de tensiones entre terminales, igual a la tensión plena entre fases del sistema, los fusibles individuales de los capacitores deben ser capaces de interrumpir la corriente de corto circuito del sistema en caso de

falla del capacitor. Además las interconexiones entre bastidores es mas complicada en la conexión delta que en la conexión estrella lo que ocasiona el uso de más materiales y por ende un costo mayor.

CONEXION EN ESTRELLA CON NEUTRO CONECTADO A TIERRA

En este tipo de conexión (que se muestra en la figura 4.31) el -- corto circuito de un capacitor significa la puesta a tierra de -- una fase del sistema de alimentación.

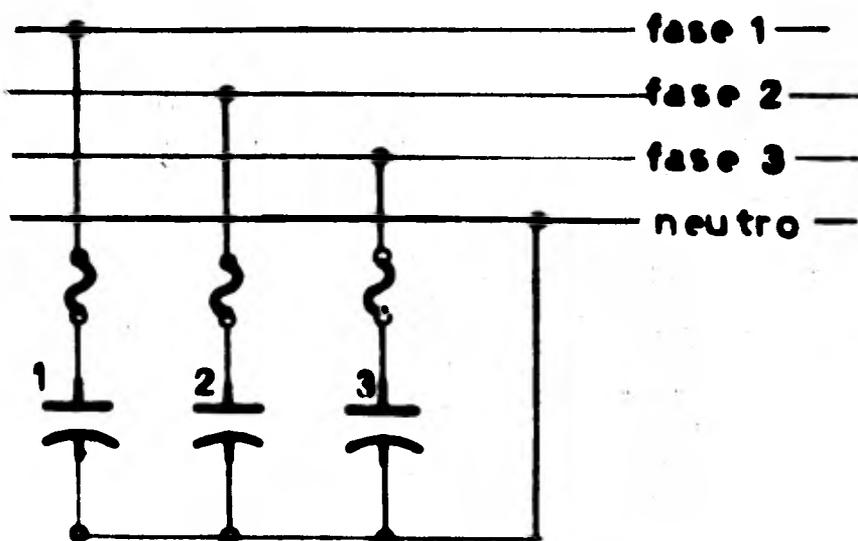


FIGURA (4.31) CONEXION EN ESTRELLA (CON EL NEUTRO A TIERRA).

La potencia del corto circuito depende aquí del corto circuito monofásico del sistema en el punto de localización de los capacitores.

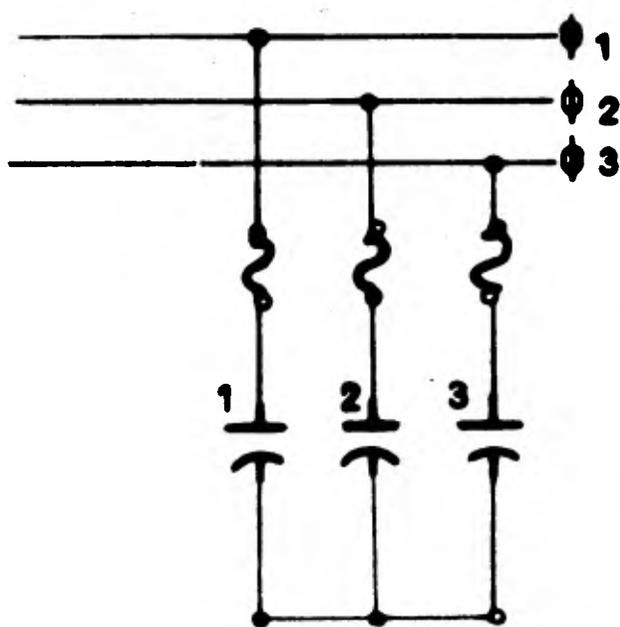
Fundido un fusible los otros dos capacitores quedan conectados a su tensión nominal, en la fase afectada la corriente se anula, y por las otras dos circula la corriente nominal.

Este tipo de conexión requiere condiciones especiales en la protección por fusibles, los cuales deben interrumpir corrientes en corto circuito mucho mayores que las que se presentan en la conexión

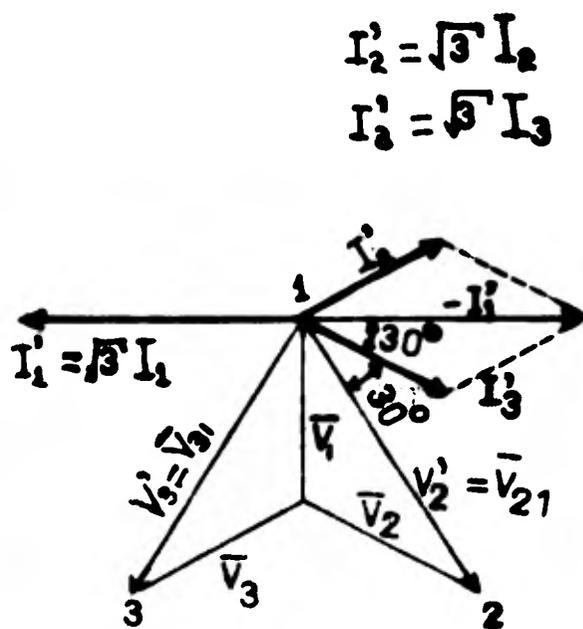
con neutro flotante y cuyo costo es bastante elevado. Además la conexión a tierra puede ser vehículo para llevar terceras armónicas, lo cual puede causar interferencias con circuitos de comunicaciones.

Una ventaja importante de ésta conexión es que facilita la operación de los fusibles de protección al suceder cualquier falla de corto-circuito; además con ésta conexión se evitan sobre voltajes excesivos en los momentos de la conexión y desconexión de bancos de capacitores instalados en líneas de tensión elevada.

CONEXION EN ESTRELLA CON NEUTRO FLOTANTE



(a)



(b)

FIGURA (4.32)

En la figura (4.32.a) se muestra la conexión en estrella con el neutro flotante.

La puesta en corto circuito de un capacitor se traduce en la conexión del neutro a la fase correspondiente por lo que la tensión entre los bornes del capacitor fallo se anula y no se produce nin

gún corto circuito.

Por ejemplo:

La falta del capacitor 1, en la figura (4.32.a) lleva a los valores del diagrama vectorial de la figura (4.32.b); la tensión al neutro en las fases no dañadas se hace $\sqrt{3}$ veces la nominal y por ende la corriente aumenta en la misma proporción en ambas fases; por la fase con fallo (1) circula la resultante de ambas corrientes, que viene a ser $\sqrt{3}$ veces la nominal, haciendo actuar el fusible por sobrecarga y no por corto circuito. Los fusibles pueden ser entonces de baja capacidad interruptiva que a su vez hacen más económica la protección, señalando además que se economiza también en la protección con los relevadores.

Se podría decir, si no existiera el peligro de caer en una generalización, que este tipo de conexión en las más comúnmente usada en los sistemas de alta tensión ya que en este caso los disturbios propios del sistema no son transmitidos al circuito de protección de los capacitores y no existe un camino expedito al flujo de las terceras armónicas.

Toda maniobra de capacitores debe realizarse con dispositivos de cierre y apertura rápidos, pues en caso contrario la ionización del aire entre contactos da lugar a un arco de corriente cuyos efectos pueden ser dañinos, por esto deben tomarse en cuenta los efectos de la forma de conexión de los bancos en su maniobra.

Con el banco conectado en delta su desconexión de la red no se modifica sensiblemente con la apertura, simultánea o no, de los tres contactos, lo que justifica que la protección con fusibles resulte adecuada. La desconexión de una primera fase implica que la segunda en cortar encuentra la carga reducida en la relación $1.5/\sqrt{3}$. Para la maniobra de conexión del banco, en cambio, la falta de simultaneidad en la operación de los tres contactos del equipo de conexión se traduce en que el tercero encontrará a los dos capacitores a él ligados ya cargados a una tensión mitad de la no

minal pero defasada 120° lo que se traduce en una marcada mayor exigencia del poder de cierre por la posible eventualidad de arcos en los contactos del dispositivo de conexión.

En bancos conectados en estrella, sean con neutro flotante ó conectado a tierra, las operaciones de cierre y apertura pueden realizarse indistintamente en forma simultánea ó sucesiva, ya que la carga de los capacitores de cada fase depende principalmente de la tensión de fase a la que están conectados. Esto permite utilizar tres interruptores monofásicos que para potencias de hasta 3000 KVAR pueden ser mas económicos que sus similares trifásicos.

Todo lo anterior implica que, bajo el punto de vista de una protección más económica, la conexión en estrella con neutro flotante puede resultar ventajosa frente a la conexión estrella con neutro conectado a tierra.

Cuando se instalan capacitores en paralelo en una misma fase debe prevenirse que en caso de fallar un capacitor, además de la corriente de corto circuito asociada con la red de alimentación, existe un flujo instantáneo de corriente adicional originado por la descarga de los capacitores conectados en paralelo con la unidad fallada.

Estas corrientes, aunque se amortiguan en pocas milésimas de segundo, suelen ser de gran intensidad y de elevada frecuencia. Este fenómeno no es de consecuencias graves si se tiene la precaución de no sobrepasar una capacidad de almacenamiento de energía eléctrica en capacitores de 1000 Watt-segundo aproximadamente.

En un banco ésta energía almacenable puede calcularse con la expresión (4.3).

O sea:
$$E = \frac{CV^2}{2}$$

donde en este caso:

C es la capacidad total de los capacitores instalados en paralelo.

V es el voltaje nominal de los capacitores multiplicado por $\sqrt{2}$ y por 1.1.

(siendo 1.1 un factor que prevee que en el momento del fallo los capacitores puedan estar operando al límite máximo de tensión tolerable).

En la práctica se considera recomendable no sobrepasar de 3000 -- KVAR la potencia reactiva instalada. Normalmente para conectar y desconectar capacitores de potencia en alta tensión se usan interruptores de baja capacidad interruptiva o desconectores a -- los que no se exige capacidad interruptiva para corrientes de corto circuito. El desconectador complementado con fusibles de po--tencia adecuados suele proporcionar una solución segura y económi--ca.

En baja tensión se adopta una solución análoga usándose contactores con fusibles. Como estos desconectores y contactores deben ser capaces de resistir las corrientes de conexión al sistema en -- posición de contactos cerrados debe comprobarse que éstas no exce--dan a los valores de corriente de corto tiempo especificados por el fabricante.

La corriente nominal del equipo de conexión y desconexión usado -- para operar bancos de capacitores en alta tensión debe exceder en un 35% como mínimo la corriente nominal del banco de capacitores.

En instalaciones de bancos fijos de pequeño tamaño pueden usarse cuchillas desconectoras ó bien cuchillas cortacircuitos fusi--bles. Estas deben contar con una capacidad interruptiva apropiada a la magnitud del corto circuito del sistema. La conexión y -- desconexión esporádica de bancos de capacitores, por medio de cu--chillas, se efectúa hasta voltajes de línea que no excedan a 25 -- KV.

Para operar bancos de capacitores desconectables se usan desconec

tadores ó interruptores (con capacidad interruptiva) que interrumpen el arco de corriente para variados medios a saber:

Cámaras de aceite
 Cámaras de vacío
 Aire comprimido
 Aire ionizado
 Exafluoruro de Azufre

El desconectador (ó interruptor) en aceite es el equipo que resulta normalmente mas económico como medio de conexión y desconexión de bancos de capacitores en alta tensión. Pueden ser operados automáticamente por medio de una señal especial de control ó manualmente cuando así se requiera. Su aplicación esta determinada por el voltaje de operación así como por la carga en KVAR (que determinará una cierta corriente), que son capaces de manejar en condiciones normales de operación.

Aunque para bajos voltajes puede usarse equipo de desconexión estandar lo más recomendable es usar equipo que ha sido diseñado especialmente para operar con cargas capacitivas puras. Para líneas cuyo voltaje no exceda a 14.4 KV pueden usarse desconectadores monofásicos de bajo costo. Para líneas de hasta 34.5 KV y -- bancos de pequeña capacidad pueden usarse desconectadores trifásicos también de un costo relativamente bajo.

Los desconectadores de cámara de vacío resultan económicos y apropiados para operar bancos de capacitores de tamaño medio y voltajes de línea de hasta 34.5 KV. Normalmente estos desconectadores operan libres de re-arqueos.

Los interruptores de aire comprimido tienen una capacidad interruptiva libre de re-arqueos muy eficaz. Se usan hasta voltajes de línea de 34.5 KV.

Los interruptores con cámara de aire ionizado pueden usarse para operar bancos de capacitores aunque no operan libre de re-arqueos

sin embargo se ha observado que en la práctica no producen sobrevoltajes muy violentos. Se usan hasta voltajes de línea de 13.8-KV.

Los interruptores con cámaras de exafluoruro de azufre de diseño-estándar operan prácticamente libres de re-arqueos y resultan -- muy apropiados para la conexión y desconexión de bancos de capacitores de potencia. Se usan en voltajes de línea hasta de 34.5 KV.

3.6) CONTROL AUTOMÁTICO DE CONEXION Y DESCONEXION DE CAPACITORES DE POTENCIA.

Los bancos de capacitores desconectables operados en forma automática pueden permitir la máxima explotación de los beneficios propios del uso de capacitores para cualquiera que sean las condiciones de carga.

La operación automática se efectúa por medio de controles sensibles a una cierta magnitud física cuya fluctuación a lo largo del tiempo determina los momentos en que el banco de capacitores entra o sale de operación.

La instalación de capacitores es muy compleja cuando se trata de instalaciones grandes y con motores de diferentes potencias. Para una compensación de potencia reactiva en grupo; si por ejemplo un grupo de bancos de capacitores compensan el f.p. de un sector de motores y éstos se desconectan sin hacer lo mismo con los capacitores, éstos trabajarán prácticamente en vacío, sin rendimiento lo cual puede traducirse en una sobre compensación que llega a -- adelantar el factor de potencia y a elevar la tensión nominal de operación.

Lo ideal en una instalación con muchos motores, para evitar que -- trabajando unos pocos deban estar conectados todos los capacitores, es montar un regulador de potencia reactiva el cual conectará y desconectará capacitores a medida que baje ó suba la demanda de potencia reactiva. Estos controles son calibrados conveniente

mente para que envíen una señal de cierre ó apertura al contactor ó desconectador del banco en los momentos en que éste debe operar. Existe normalmente un retardo de tiempo entre la detección de la señal de operación y la orden de operación en si, con la doble finalidad de que el control no actúe indebidamente excitado por una fluctuación transitoria, y de hacer posible la coordinación con algún otro sistema de protección ó control.

Los elementos básicos de un control-regulador automático son:

- i) Un elemento que detecta los cambios de magnitud física (variable de control) a la que el control es sensible.
- ii) Un juego de contactores, capaces de iniciar la operación de cierre ó de apertura del desconectador, operados por el elemento sensible cuando la variable de control alcanza ciertos valores predeterminados.
- iii) Un medio de ajustar los valores predeterminados, de la variable de control, para los que deben operar los contactores.
- iv) Un retardo de tiempo, muchas veces ajustable, entre el momento en que la variable de control ha alcanzado un valor de operación y la señal final de operación.

Existe una gran variedad de controles automáticos sensibles a las diferentes magnitudes físicas; tensión de línea, corriente, potencia reactiva demandada por la carga, etc. Para elegir el control más adecuado en una aplicación particular es conveniente tomar datos experimentales sobre como varían las distintas magnitudes físicas mencionadas en el punto destinado a la instalación del banco de capacitores. De ésta manera puede determinarse cual es la variable cuya fluctuación se ajusta más a la secuencia de tiempo de operación que debe seguir el banco de capacitores (ó cada una de las secciones en que esté dividido).

CONTROLES DE VOLTAJE

Son los controles de uso común en la operación automática de ban-

cos de capacitores. El elemento sensible consiste de un voltmetro capaz de abrir y cerrar los contactos que inician la operación del desconectador del banco. Pueden usarse en lugares donde el voltaje descienda cuatro volts mínimo en condiciones de plena carga. La conexión de los capacitores al sistema proporciona corrientes reactivas a la carga y hace subir el voltaje. La desconexión de los capacitores se efectúa en los períodos en que tiende a subir el voltaje por haber disminuido la carga.

La subida de tensión que origina la conexión de un banco de capacitores ó bien una sección de un banco de capacitores, dividido en secciones desconectables, puede calcularse (en tanto por ciento) por medio de la expresión:

$$e = \frac{x}{10 (KV)^2} Q \quad (4.22)$$

o bien

$$e = \frac{100 x Q}{KVA_{CC}} \quad (4.22.a)$$

donde:

Q es la potencia reactiva del banco de capacitores en KVAR (ó de la sección).

x es la reactancia total por fase de la línea en OHMS.

KV es el voltaje nominal de la línea en kilovolts.

KVA_{CC} es la potencia de corto circuito trifásico del sistema en el punto de instalación de los capacitores.

La diferencia entre el voltaje máximo y el voltaje mínimo a que se calibra el control para que origine las operaciones de desconexión y conexión respectivamente del banco de capacitores se llama ANCHO DE BANDA. El ancho de banda debe elegirse de forma que sea siempre mayor que la elevación de voltaje que produzca cualquier sección del banco de capacitores al entrar en operación; de otra forma se producirían operaciones repetitivas, de conexión y desconexión, fuera de control. Este fenómeno se conoce como BOMBEO --

DEL CONTROL.

CONTROLES DE CORRIENTE.

También son de uso común. El transformador de corriente que alimenta al elemento sensible de estos controles (un ampermetro) debe ser instalado entre los capacitores y la carga de manera que en cualquier momento el control reciba la señal de corriente total que está demandando la carga. Así los capacitores pueden entrar en operación en los períodos de máxima carga. No debe instalarse este control antes de los capacitores, es decir entre los capacitores y la fuente de energía ya que al entrar en operación el banco de capacitores disminuiría la corriente que detecta el control y este haría que salieran de operación los capacitores -- provocándose un bombeo del control.

CONTROLES DE VOLTAJE COMPENSANDO CON CORRIENTE.

Estos controles cuentan con un elemento sensible a voltaje (la variable de control es el voltaje) compensado con otro elemento sensible a corriente. Cuando la corriente de las líneas se mantiene inferior a un cierto valor predeterminado el control actúa como un simple control de voltaje; sin embargo cuando la corriente de las líneas sobrepasa dicho valor actúa un relevador que cambia la calibración del elemento sensible a voltaje y hace entrar en operación a los capacitores. Estos se mantienen conectados mientras la corriente siga excediendo al valor predeterminado, a no ser -- que el voltaje de la línea suba a un valor suficiente como para volver a calibrar el elemento sensible a voltaje reestableciendo las condiciones iniciales.

Una ventaja importante de éstos controles con respecto a los controles de corriente es que si en condiciones de baja carga se presentan un descenso de voltaje, debido a alguna perturbación en -- las líneas, los capacitores pueden entrar en operación tendiendo a subir el voltaje. De ésta forma se usan los capacitores en el momento en que se les necesita.

CONTROLES DE TEMPERATURA

Aunque su uso es muy limitado pueden resultar útiles en zonas donde exista una relación clara entre las necesidades de reactivos y la temperatura ambiente. Este puede ser el caso de zonas en las que la parte fundamental de la carga corresponde a equipos de aire acondicionado.

CONTROLES DE PASOS MÚLTIPLES

Se utilizan para el control de bancos divididos en secciones desconectables principalmente en baja tensión donde son muy comúnmente usados; suele tratarse de bancos de capacitores destinados a mantener el f.p. de una instalación próxima a la unidad. El elemento sensible de estos controles suele ser un voltmetro, un ampermetro ó un medidor de potencia reactiva. Cada control puede accionar un cierto número de secciones operadas por contactores ó desconectadores individuales en forma automática. Normalmente el número de secciones no puede sobrepasar de 10 ó 12 a fin de evitar que se presenten bombeos del control.

El elemento de medición de los controles reguladores que se fabrican para uso en instalaciones eléctricas industriales, efectúa la medición del valor de la corriente reactiva al paso por cero de la tensión de línea. Si el valor inductivo ó capacitivo medido es superior ó inferior al valor de la corriente de respuesta prefijado (regulado) se enciende la señal correspondiente, y después de un tiempo (10-20 seg.) sigue la orden de conexión ó desconexión y con ello se conectan ó desconectan, de acuerdo a la orden programada uno ó más juegos de contactores que a su vez ponen o quitan de operación a una ó mas secciones de capacitores. El $\cos \theta$ a obtener puede ser regulado desde $\cos \theta = 0.95$ capacitivo pasando por $\cos \theta = 1$ y hasta $\cos \theta = 0.8$ inductivo. Con ayuda de estas tres posibilidades de regulación puede ser ajustado en forma simétrica ó asimétrica ó bien que el regulador actúe únicamente en el campo inductivo ó capacitivo. Estos reguladores también

cuentan con una señal luminosa que indica la sección de capacitores alcanzada, ya sea en conexión paso a paso ó saltada según sea programada.

Manualmente también se pueden conectar o desconectar otros escalones como lo indica la figura (4.33).

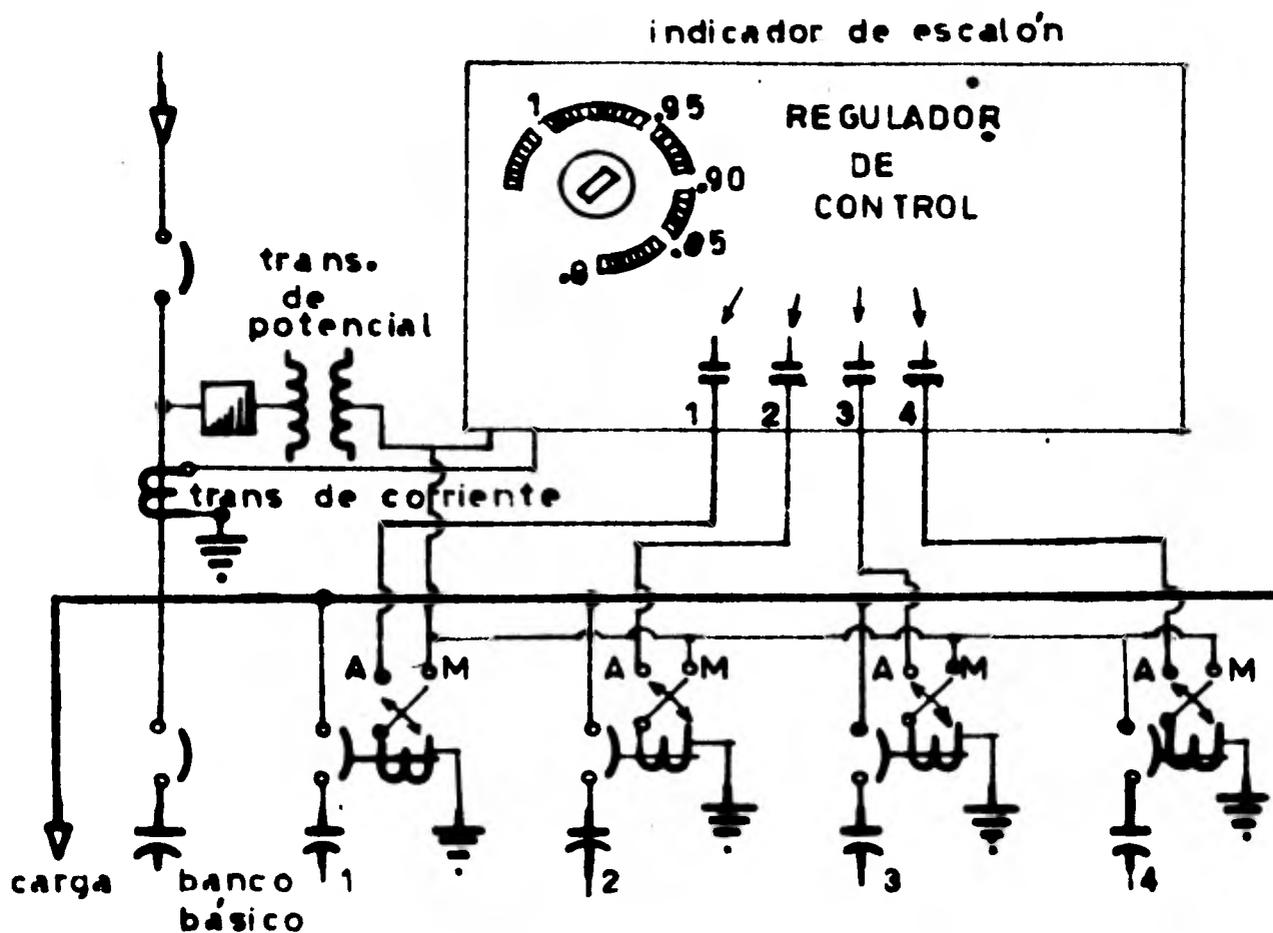


FIGURA (4.33)

La aplicación mas efectiva de una gran cantidad de capacitores -- en una sub-estación por ejemplo, se logra mediante la conexión de dos ó mas bancos al mismo nivel de tensión.

En alta tensión se trata normalmente de grandes bancos de capacitores cuya potencia reactiva debe ser dividida en varios pasos a fin de que su suministro no sobrepase en ningún momento las necesidades de la carga, sin que por otro lado quede excesivamente bajo.

En baja tensión se pueden manejar de dos a doce pasos con un control de secuencia.

Un control de secuencia viene en dos gabinetes separados; una unidad que contiene los elementos de control y la otra unidad que -- contiene el mecanismo de secuencia de pasos y de mando operado -- por levas y relevadores. Uno de los relevadores piloto inicia -- una señal de cierre ó de apertura y también arranca el ciclo de -- mecanismo de levas. La operación de levas en realidad logra cuatro objetivos distintos:

- 1) Dar el retardo entre los pasos.
- 2) Selecciona el ó los siguientes bancos a conectar
- 3) Selecciona el siguiente banco a desconectar
- 4) Determina si al final del ciclo de la leva aun persiste el contacto inicial.

Esta secuencia se repite hasta que desaparezca el contacto ini--- cial ó hasta que haya conectado el último banco.

Siempre se mantiene una secuencia fija de modo que el último banco conectado será el primero en desconectarse y así sucesivamen-- te.

En la figura (4.33) aparece un esquema unifilar de conexiones del tablero de control de la línea y de los capacitores.

Suponga el caso de dos baterías de capacitores C_01 y C_02 conectados en delta. En una línea de alimentación trifásica como se indica en la figura (4.34).

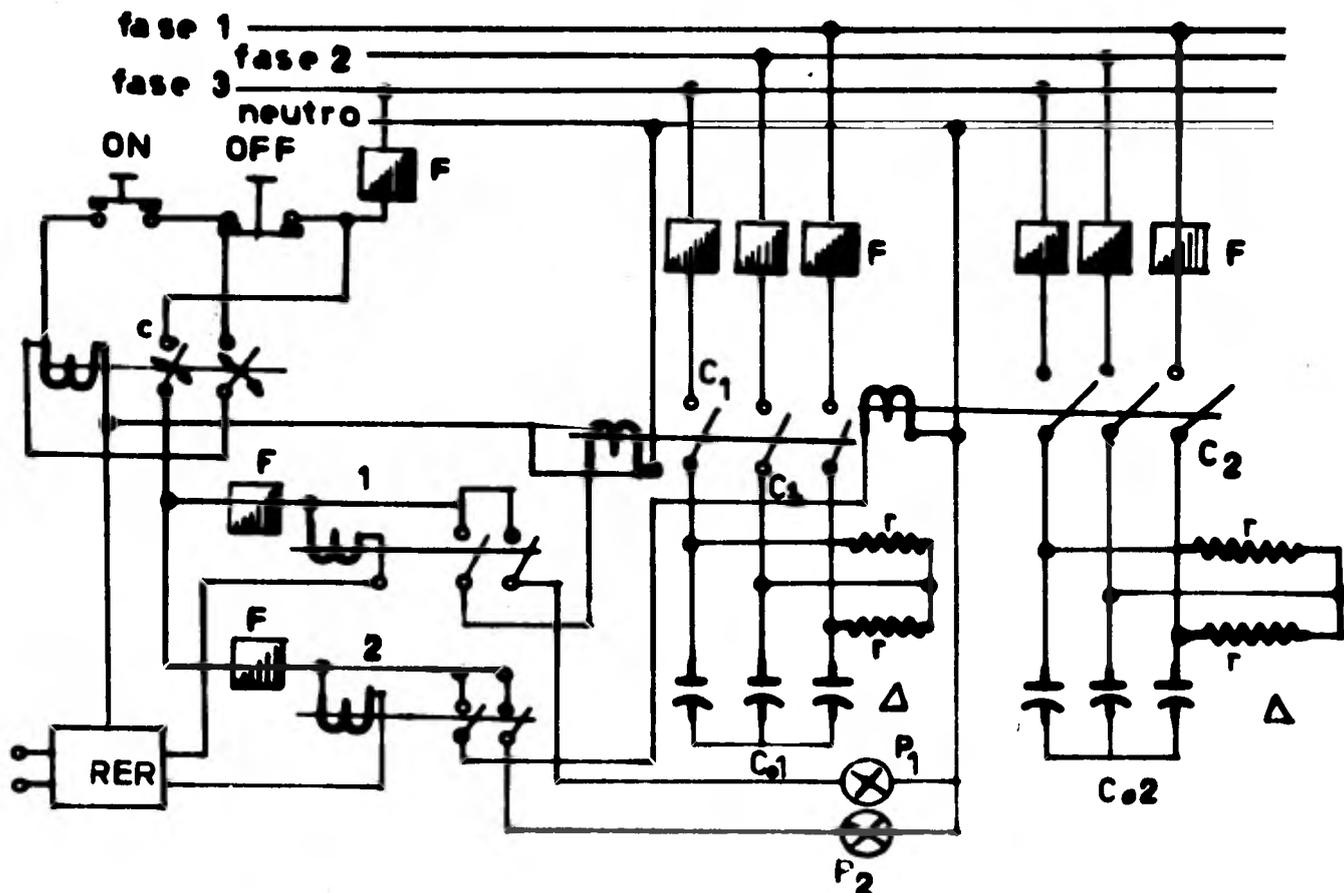


FIGURA (4.34)

En esta figura se indica el circuito de mando y el circuito propio de los capacitores conectados a la línea. Una vez alimentado el regulador -RER- éste controla la energización de las dos bobinas 1 y 2.

Si la demanda de potencia reactiva aumenta el regulador hará operar la bobina 1 y sus contactos, uno de los cuales permite que opere el contactor C_1 dando paso a la corriente que circulará por la batería de capacitores C_01 y el otro contacto encenderá-

el piloto P_1 señalando el funcionamiento de la sección de capacitores C_01 .

Si la potencia suministrada por ésta sección no es suficiente, el control operará la bobina 2 y sus contactos operaran al contactor C_2 , que a su vez pondrá en servicio la sección C_02 de capacitores y su piloto señal P_2 . Si la demanda de potencia reactiva baja, y esto necesita la desconexión de una ó dos baterías de capacitores, el regulador va desenergizando las bobinas 1 y 2 las que al abrir sus contactos dejan de excitar a las bobinas de los contactores de trabajo C_1 y C_2 de las secciones C_01 y C_02 respectivamente. Si por cualquier eventualidad los capacitores deben ponerse fuera de servicio se pulsa en el botón off y la bobina 3 abrirá el servicio a todas las demás bobinas y en consecuencia a todos los capacitores. Cada banco de capacitores posee en derivación las resistencias de descarga T que permiten descargar completamente los capacitores antes de volver a ser conectados.

3.7) CONDICIONES DE OPERACION Y MANTENIMIENTO DE CAPACITORES

VENTILACION

Los capacitores idealmente se comportan como sistemas conservativos, pero en la práctica existe algo de disipación de energía en forma de calor en un porcentaje muy pequeño de la potencia del capacitor; pero debido a las cantidades de energía que los capacitores manejan, este calor producido llega a alcanzar magnitudes importantes. Es por esto que para evitar que la temperatura del capacitor se eleve se debe proporcionar al capacitor una ventilación apropiada.

El operar a una temperatura media de unos 10°C por encima de la temperatura normal de operación puede significar una disminución en la vida media del capacitor en más de un 70%. Sobrecalentamientos mayores producen efectos de deterioro que afectan la vida media del capacitor en forma exponencial.

Cuando los capacitores se instalan al aire libre la forma más ---

usual y más simple de disipar calor es por convección natural. -- En este caso la precaución principal a tener en cuenta es la de respetar los espacios de separación entre capacitor y capacitor que recomienda el fabricante. Conviene instalar los capacitores en bastidores que los eleven del piso (unos centímetros) y asegurarse que la ventilación no quede obstruida por ningún obstáculo.

Cuando los capacitores se instalan en un local cerrado o en un gabinete, además de las precauciones indicadas anteriormente, debe tomarse cuidado especial en comprobar que las temperaturas ambiente del local ó del interior del gabinete, medidas cuando los capacitores se encuentran en operación normal no sobrepase los límites máximos recomendados por las normas de fabricación de los capacitores.

Las normas CCONNIE, NEMA y ANSI especifican que el fabricante debe garantizar la estabilidad térmica de los capacitores cuando estos se instalen respetandose las distancias que él especifique y en un medio ambiente cuya temperatura no sobrepase los límites máximos siguientes:

METODO DE MONTAJE	TEMPERATURA MEDIA DE 24 HRS. DEL DIA MAS CALUROSO DEL AÑO	TEMPERATURA MEDIA ANUAL
Capacitor aislado	46° C	35° C
Capacitores instalados en una hilera	40° C	25° C
Capacitores en varias hileras contiguas	35° C	20° C
En locales cerrados	35° C	20° C

TABLA (4.G)

En locales cerrados, si hay peligro de que se sobrepasen las temperaturas indicadas en esta tabla (4.G) debe instalarse un sistema de ventilación forzada.

Los problemas de ventilación suelen ser mas críticos en capacitores de alta tensión debido a las altas concentraciones de energía instaladas normalmente. Sin embargo estos problemas no deben subestimarse en instalaciones a bajas tensiones industriales.

FRECUENCIA Y VOLTAJE DE OPERACION

Es importante conocer exactamente la frecuencia y el voltaje de operación en los capacitores.

La potencia reactiva de los capacitores es función del voltaje y de la frecuencia. Esta relación esta dada por la siguiente expresión:

$$\text{KVAR} = \frac{(\text{KV})^2 \times 10^3}{X_C} \quad (4.23)$$

donde si $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$

$$\text{o sea KVAR} = 2\pi fC (\text{KV})^2 \times 10^3 \quad (4.23a)$$

Como se puede deducir de la expresión anterior la potencia reactiva del capacitor varia linealmente con la frecuencia, o sea

$$\text{KVAR} = \alpha f, \quad (\alpha = \text{constante de proporcionalidad}).$$

Los capacitores de potencia fabricados bajo normas americanas se diseñan para operar a una frecuencia nominal de 60 Hz. Sin embargo no existe ningún inconveniente para que éstos operen a frecuencias mas bajas; esto implica una reducción de la potencia reactiva suministrada, proporcional a la reducción de frecuencia de la igualdad:

$$\frac{\text{KVAR}_{\text{nom}}}{\text{KVAR}_2} = \frac{\alpha f_{\text{nom}}}{\alpha f_2}$$

$$\text{KVAR}_2 = \text{KVAR}_{\text{nom}} \frac{f_2}{f_{\text{nom}}} \quad (4.24)$$

En operación normal la frecuencia aplicada nunca debe exceder a la frecuencia nominal. ($f_2 < f_n$),

Con respecto al voltaje, la potencia reactiva del capacitor cuando se opera a un voltaje distinto al nominal, está dada por la expresión:

$$\frac{KVAR_{nom}}{KVAR} = \frac{V_{nom}^2}{V^2} \quad ; \quad KVAR = KVAR_{nom} \frac{V^2}{V_{nom}^2} \quad (4.25)$$

Los capacitores de potencia para alta y a veces también los de baja tensión se fabrican de forma que puedan operar a sobre voltajes de hasta el 10% del V_{nom} , sin que aparezcan problemas de aislamientos, estabilidad térmica, etc.

Esto es para prevenir posibles fluctuaciones de voltaje de las líneas eléctricas y los pequeños sobrevoltajes que pudieran ocasionar los mismos capacitores al operar en condiciones de baja carga (f.p. adelantado). Sin embargo en operación normal debe tratarse de que el voltaje aplicado a los capacitores no exceda al valor del voltaje nominal. El operar permanentemente a un sobrevoltaje del 10% puede disminuir la vida de un capacitor hasta en un 50%.

CORRIENTE NOMINAL DE OPERACION

La corriente nominal de un capacitor monofásico puede calcularse por medio de la expresión:

$$I_{nom} = \frac{KVAR_{nom}}{KV_{nom}} \quad (4.26)$$

y para un capacitor trifásico:

$$I_{nom}/fase = \frac{KVAR_{3\phi}}{\sqrt{3} KV} \quad (4.27)$$

Esta expresión es independiente de la conexión interna del capacitor delta ó estrella.

Así combinando (4.23) y (4.26) se obtiene:

$$I = 2\pi fC (KV) \times 10^3 \quad (4.27)$$

De ésta expresión (4.27) se deduce que la corriente que toma un capacitor es directamente proporcional a la frecuencia de operación, a su capacidad y al voltaje aplicado a sus bornes.

CORRIENTES ARMONICAS

Las ondas senoidales distorsionadas tienen componentes senoidales de frecuencias mayores (múltiplos de la fundamental) llamadas armónicas. Existen instalaciones industriales que son especialmente propicias a generar corrientes armónicas de importancia. Instalaciones de hornos metalúrgicos de arco, hornos de inducción, grandes motores que entran y salen de operación muy frecuentemente, rectificadores a base de S.C.R. (semiconductores controlados).

Cuando se usan capacitores para corregir el f.p. en instalaciones de este tipo deben tomarse ciertas medidas ya que las componentes armónicas de la tensión pueden causar que los capacitores queden sometidos a corrientes excesivas que causen una disminución notable en su vida e incluso fallas de unidades en corto tiempo de operación. Si se determina por medio de un osciloscopio ó un voltmetro de armónicas que la señal de voltaje que llega a los capacitores contiene las armónicas de 3°, 5°, 7°, etc. con valores eficaces e_3 , e_5 , e_7 , etc. medidos en porcentaje de la fundamental. = El valor eficaz del voltaje aplicado al capacitor viene dado por la expresión siguiente:

$$V = 0.01 V_n \sqrt{100^2 + e_3^2 + e_5^2 + \dots} \quad (4.28)$$

y la corriente eficaz que toma cada capacitor:

$$I = 0.01 I_n \sqrt{100^2 + 9e_3^2 + 25e_5^2} \quad (4.29)$$

Siendo V_n e I_n el voltaje y la corriente nominales respectiva-

mente a la frecuencia nominal del capacitor.

El incremento de potencia reactiva de operación debido exclusivamente a la existencia de estas armónicas puede calcularse en % del nominal según la expresión:

$$\Delta KVAR \cong 0.01 [3e_3^2 + 5e_5^2 + 7e_7^2 + \dots] \% \quad (4.30)$$

(\cong es aproximadamente).

La expresión (4.27) muestra claramente qué producen estas armónicas sobre la corriente que toma el capacitor. Por ejemplo:

- Si una onda de voltaje distorsionada como la mostrada en la figura (4.35), se aplicara a un capacitor según la expresión (4.29), tendremos:

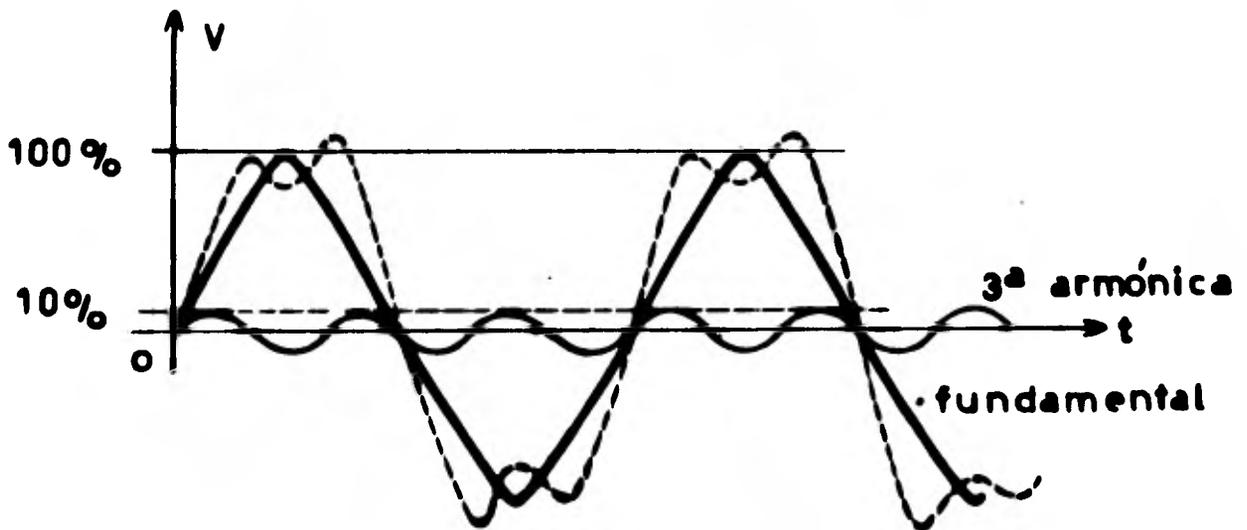


FIGURA (4.35) COMPONENTES ARMONICAS DE UNA ONDA SENOIDAL DISTORSIONADA.

$$I_c = 0.01 I_n \sqrt{100^2 + 9(10)^2}$$

$$I_c = 0.01 I_n (104.4)$$

$$\frac{I_c}{I_n} = 1.044$$

Por tanto se tendran sobrecorrientes del 4.4%.

El ejemplo es bastante ilustrativo de lo que pasaria si se opera-se el capacitor con ondas de voltaje dispotsionadas. Las corrientes armónicas que suelen encontrarse en la práctica son de orden-impar.

Para los capacitores de potencia de alta tensión las normas ----- CONNIE, NEMA y ANSI recomiendan un límite máximo de un 10% en -sobrevoltaje para el voltaje total resultante. La sobrecorriente máximo permitida debida a la onda de voltaje fundamental y sus ar-mónicas es del 35% de la corriente nominal.

La combinación de ambos factores sobre voltaje y sobrecorriente -no debe sobrepasar el incremento de potencia reactiva de opera---ción máximo permitido que es un 35% con respecto a la nominal.

Para los capacitores de baja tensión el fabricante puede especificar limites más bajos.

Cuando se presenta un problema de sobrecarga los capacitores sue-len mostrar sintomas de una temperatura de operación excesivamen-te elevada y, en las peores circunstancias, una deformación del -tanque que indica altas presiones internas a las que está sometido el aparato debido a la dilatación del liquido impregnante.

Cuando se plantea un banco de capacitores para este tipo de insta-laciones en el que cabe esperar perturbaciones en la onda de vol-taje, debe preverse la existencia de sobrecorrientes tanto en su alambrado como en todos sus accesorios y equipo auxiliar.

Especialmente deben tomarse las precauciones siguientes:

- i) tomar cuidado especial en la ventilación ó incluso refrige-

ración del banco.

- ii) dejar el neutro flotante en caso de conexión en estrella.

Si persiste el problema de sobrecarga se puede ver si es posible desconectar el banco en los periodos de máxima generación de armónicas.

Si nada de lo anterior resuelve el problema, puede pensarse en -- instalar filtros en serie con el banco de capacitores (inductancias) que unicamente permitan pasar la onda fundamental.

MANTENIMIENTO DE CAPACITORES

Después de instalado un banco de capacitores debe efectuarse la inspección del mismo comprobando:

- i) que los voltajes de las fases estén balanceados y permanezcan dentro de los límites aceptables según las especificaciones de los capacitores.
- ii) que la potencia reactiva de operación del banco no exceda en más del 35% a la potencia nominal del mismo.

Esta inspección debe repetirse varias veces durante los primeros periodos de baja carga que es cuando el voltaje toma sus valores máximos.

Como mantenimiento preventivo deben de efectuarse periódicamente revisiones del estado de los capacitores teniendo en cuenta lo siguiente:

- ventilación de los capacitores
- estado de los fusibles
- temperatura de operación
- medición del amperaje en cada fase
- limpieza de las porcelanas de los bornes
- revisar el estado de las conexiones

Antes de tocar las terminales de un capacitor que previamente ha-

sidó energizado, deben dejarse transcurrir 5 minutos para su descarga interna y después poner en corto circuito las partes vivas a tierra. Los mismos capacitores pueden dañarse si se ponen en corto circuito las partes vivas antes de que haya transcurrido -- por lo menos un minuto de descarga.

4) EL MOTOR SINCRONO COMO ALTERNATIVA EN LA CORRECCION DEL BAJO f.p.

Las bases de funcionamiento del motor sincrónico son idénticas a las de un generador de C.A.¹, con la diferencia de que sus objetivos son inversos, es decir, en vez de que nos suministre energía eléctrica la consume y nos proporciona energía mecánica en vez de consumirla.

El diagrama simplificado de una máquina sincrónica trifásica de 2 polos se muestra en la fig (4.35').

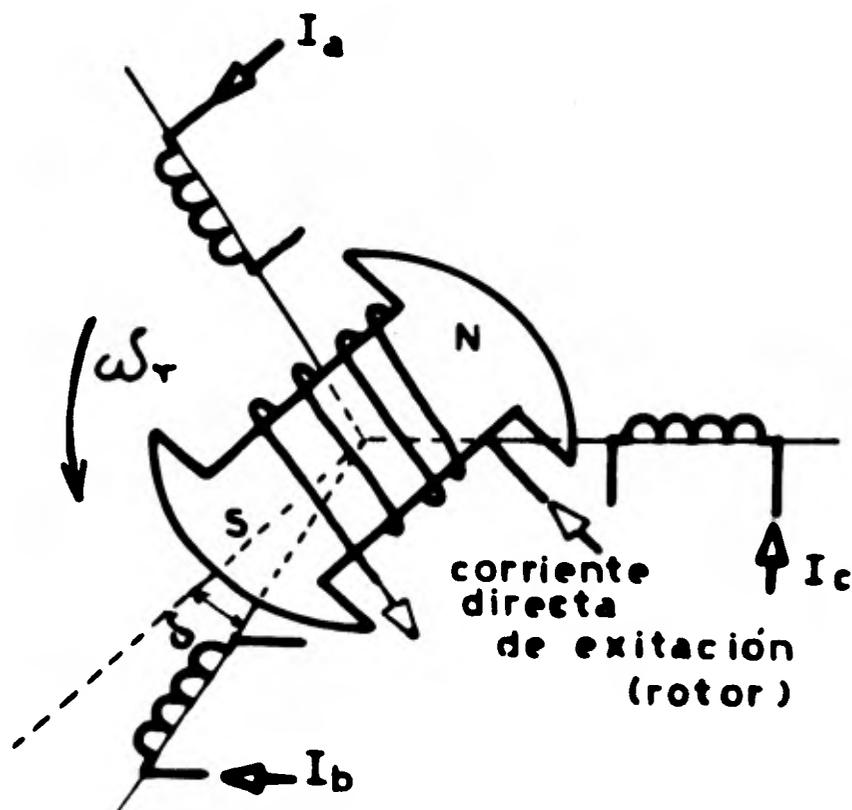


FIG. (4.35') DIAGRAMA DE LA MAQUINA SINCRONA

El estator consta de un número de devanados ó fases, cuyo fin principal es el de producir un campo magnético giratorio en el en

1. Ver generador elemental. Capítulo I.

trehierro de la máquina, cuyo rotor consta de un devanado al que se le conecta una fuente de corriente continua, estableciéndose un campo constante sobre la estructura del rotor; el polo norte del rotor es atraído magnéticamente por el polo sur del estator y de un modo semejante, el polo sur del rotor por el polo norte del estator, esta ligadura magnética entre los campos del rotor y del estator es la causa de que el rotor gire sincronicamente con el campo del estator, el cual al girar a velocidad constante arrastra el rotor y le obliga a girar a la misma velocidad, la posición del rotor respecto al campo del estator viene dada por " δ ".

Si se incrementa la resistencia mecánica sobre el eje de la máquina el rotor tendera a retrasarse más tras el campo, y el ángulo " δ " se hará mayor. Se puede hacer una analogía de la ligadura magnética, considerando que la fuerza de enlace entre los campos del estator y del rotor se produce por medio de tiras de goma que unen ambos campos. El aumento de la carga del rotor trae en consecuencia el alargamiento de las tiras de goma y en consecuencia el aumento de " δ ". Resistencias extremadas en el eje del rotor daran lugar finalmente, a la rotura de las tiras de goma (magnéticas) y la máquina se parara.

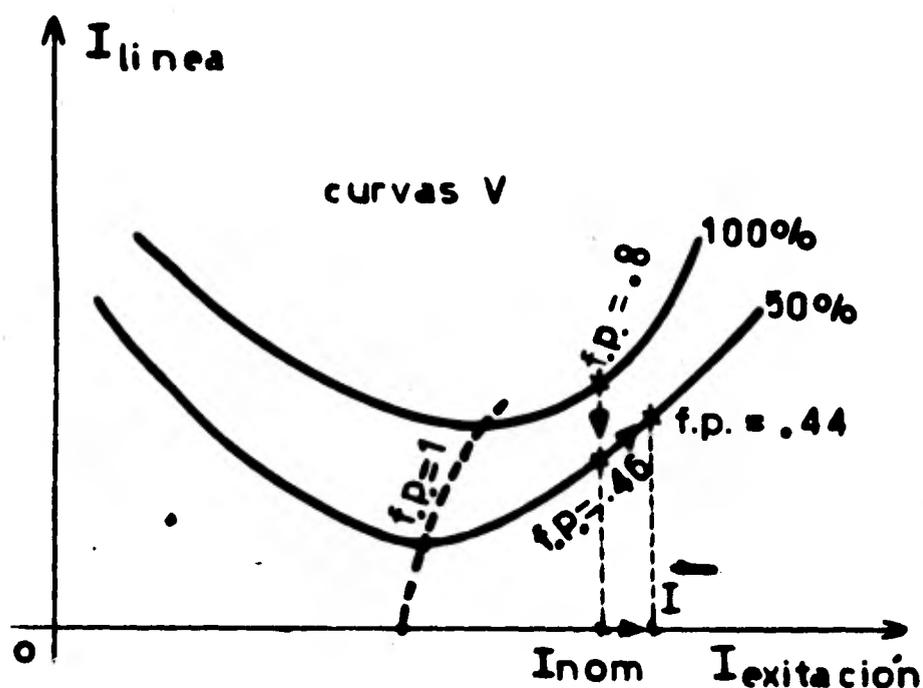


FIGURA (4,40). COMPORTAMIENTO DEL fp DEL MOTOR-SINCRONO AL VARIAR LAS CONDICIONES NOMINALES

EVALUACION ECONOMICA DE ESTA OPCION:

$\$/\text{HP} = 2000$ Aprox.

Costo de 600 HP * $\$1'200,000$

El costo de esta opción es de aproximadamente $\$1'200,000$.

OPCION 2:

Elegir un motor síncrono de 300 HP a un $f.p. = 0.8$ (adelantado) y operarlo al 100% de su carga nominal; el resto de los KVARC obtenerlos de capacitores estáticos.

De acuerdo con la figura (4.39) los (KVARC) que nos suministra el

motor son

$$\text{KVARC}_s = 300 \times 0.6 = 180$$

Por tanto hay que añadir en capacitores

$$\text{KVARC}_c = 468 - 180 = 288$$

El costo de esta alternativa es aproximadamente:

Motor =	\$ 2,000 x 300 =	\$ 600,000.00
Capacitores.- costo		\$ <u>105,600.00</u>
Costo total		\$ 705,600.00

OPCION 3

Utilizar para mover la carga un motor de inducción de 300 HP, a un $\text{fp} = 0.7$ (atras) y compensar el fp . con capacitores.

Al instalar un motor con un $\text{fp} = 0.7$ (atras) los KVARC necesarios aumentan.

	INSTALACION		MOTOR		TOTALES
$\text{KW}_T =$	3000	+	225	=	3225
KVAR =	2328	+	230	=	2558

$$\text{fp}_2 = 0.78$$

Los nuevos KVARC por suministrar serán:

$$\text{KVARC} = 3225 (0.183) = 590$$

Costo de esta opción:

Costo del motor:	\$ 300,000.00
Costo capacitores	\$ <u>216,333.00</u>
Costo total	\$ 516,000.00

Como se puede apreciar la alternativa sin utilizar el motor síncrono resulta mucho mas económica, pero la alternativa 2 (mixta)- resulta atractiva si queremos aprovechar las ventajas de regulabilidad que nos ofrece el motor síncrono.

En la figura (4.41) se indica el punto de conexión de los reactivos en los diagramas unifilares de los sistemas.

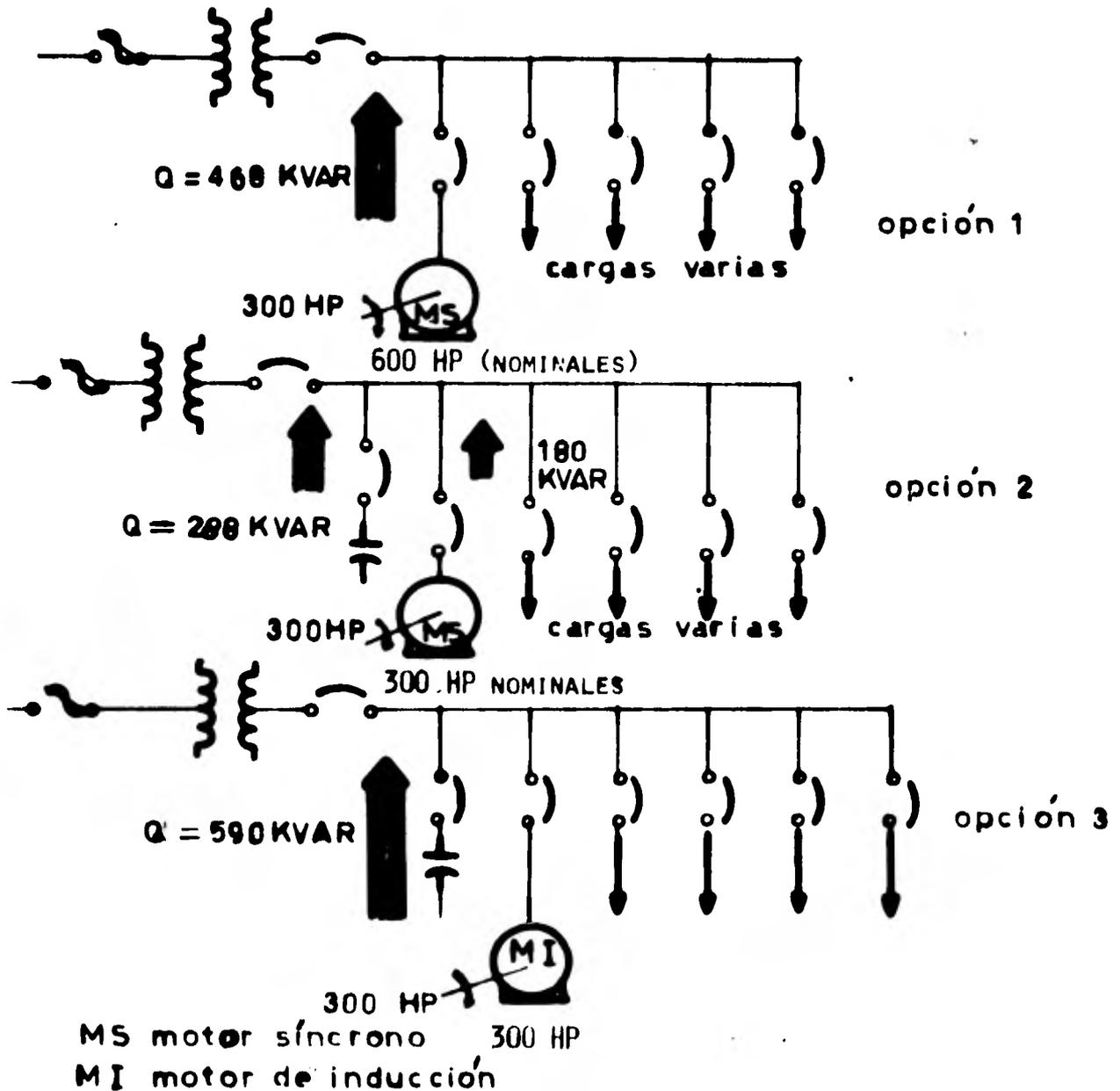


FIG. (4.41)

Cuando la máquina síncrona se utiliza únicamente para corregir -- el factor de potencia se le llama capacitor síncrono, estos capacitores, a las potencias que se manejan en la industria nacional - resultan generalmente imprácticos y antieconómicos, como se puede observar de los ejemplos anteriores; por lo que no se recomiendan en las instalaciones industriales.

CONCLUSIONES

Como se ha podido observar en el desarrollo de este trabajo, la medida de corregir el bajo factor de potencia es una inversión que se amortiza a muy corto plazo, por lo cual consideramos que después de analizar la problemática y soluciones que se han planteado no debe escatimarse en ella.

El capacitor estático surge como un elemento correctivo que brinda bondades que se adecuan los requerimientos de la industria, es decir, es un elemento que tiene muchas e insuperables ventajas respecto a las otras alternativas (motor síncrono y capacitor síncrono), tales como:

- menor inversión inicial.
- prácticamente no requiere mantenimiento.
- fácil instalación.
- dadas sus características de instalación y operación a través de Bancos discretos en distintos puntos de la red eléctrica asegura la continuidad en el proceso de corrección en caso de fallar algunas de sus unidades.
- mayor vida útil.
- producción en el mercado nacional.

Lo anterior coloca al capacitor estático en una posición ventajosa en lo que respecta a corrección del bajo F.P. en la industria, por tanto debe considerarse como única alternativa para este fin, salvo en los casos excepcionales en los que la utilización de un motor síncrono sea imprescindible por sus características de operación, en este caso podría pensarse en la utilización de esta alternativa.

APENDICE I

NUMEROS COMPLEJOS

Se entiende por número complejo, un número de la forma $Z = X + jY$, donde "X" y "Y" son números reales, y "j" es la llamada unidad imaginaria cuya existencia se define de modo que $j^2 = -1$. El número real "X" se dice componente real o parte real de Z. El número real "Y" se dice componente imaginaria o parte imaginaria de "Z".

Usaremos la siguiente notación:

$$X = \text{Re}(z) = \text{parte real de } Z$$

$$Y = \text{Im}(z) = \text{parte imaginaria de } Z$$

$$j = \sqrt{-1}$$

Los números complejos se representan en el plano complejo o de Argand por un segmento de recta dirigida del origen al punto de coordenadas (X,Y), como lo señala la fig. 1.1

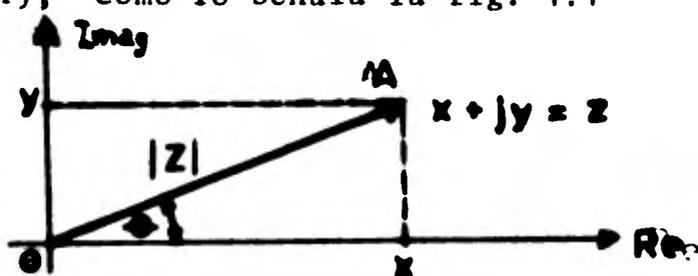


Fig. 1.1 Representación del número complejo $X + jY$ en el plano.

Los números complejos pueden representarse en forma rectangular:

$$Z = X + jY \tag{1.1}$$

o en forma polar como:

$$Z = |Z|e^{j\theta} \tag{1.2}$$

donde $|Z|$ es la magnitud o amplitud del número complejo (o sea la longitud del segmento \overline{OA} en la fig. 1.1) y θ es el argumento o fase (o sea el ángulo entre el eje real positivo y el segmento \overline{OA}). Las relaciones entre ambas representaciones son:

$$|Z| = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (1.3)$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{Y}{X} \quad (1.4)$$

$$X = |Z| \cos \theta \quad (1.5)$$

$$Y = |Z| \operatorname{sen} \theta \quad (1.6)$$

En la fig. 1.1 se muestra el sentido positivo para medir los ángulos θ . Este ángulo está en el intervalo $[0, 2\pi]$. A cada pareja de valores X y Y corresponde, por lo tanto, un solo valor de θ .

A continuación estudiaremos las principales operaciones con números complejos.

a) SUMA Y RESTA

Dados los números complejos

$$Z_1 = X_1 + jY_1$$

$$Z_2 = X_2 + jY_2$$

La suma (ó resta) de dos números complejos es otro número complejo definido por:

$$Z_1 \pm Z_2 = (X_1 \pm X_2) + j(Y_1 \pm Y_2) \quad (1.7)$$

La fig. 1.2 muestra como se suman graficamente dos números complejos.

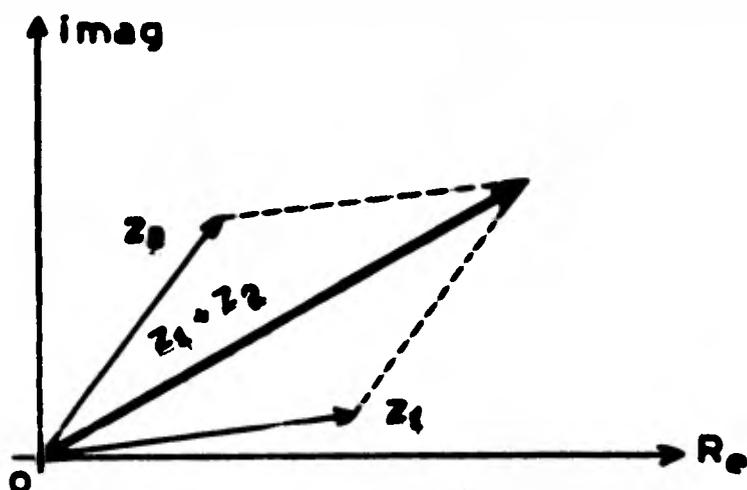


Fig. 1.2 Suma de dos números complejos aplicando la ley del paralelogramo.

b) PRODUCTO

El producto de dos números complejos Z_1 y Z_2 es otro número complejo Z definido como:

$$Z = Z_1 Z_2 = (X_1 X_2 - Y_1 Y_2) + j (X_1 Y_2 + Y_1 X_2) \quad (1.8)$$

c) DIVISION

Para realizar esta operación con dos números complejos dados en forma rectangular, hay que multiplicar denominador y numerador por el complejo conuagado del denominador para hacerlo real:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{X_1 + jY_1}{X_2 + jY_2} = \frac{[X_1 + jY_1] [X_2 - jY_2]}{[X_2 + jY_2] [X_2 - jY_2]}$$

o sea:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{X_1 X_2 + Y_1 Y_2}{X_2^2 + Y_2^2} + j \frac{-X_1 Y_2 + X_2 Y_1}{X_2^2 + Y_2^2} \quad (1.9)$$

En la forma polar la multiplicación y división están dadas por:

$$z_1 z_2 = |z_1| e^{j\theta_1} |z_2| e^{j\theta_2} = |z_1| |z_2| e^{j(\theta_1 + \theta_2)} \quad (1.10)$$

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{|z_1| e^{j\theta_1}}{|z_2| e^{j\theta_2}} = \frac{|z_1|}{|z_2|} e^{j(\theta_1 - \theta_2)} \quad (1.11)$$

respectivamente.

NOTA: Los numeros complejos no se pueden sumar (o restar) en forma polar, para multiplicarlos o dividirlos es mas conveniente tenerlos en esta forma.

d) ENESIMA POTENCIA

La elevación de un número complejo a una potencia n , donde n es un número entero, esta dada por:

$$z^n = \left[|z| e^{j\theta} \right]^n = |z|^n e^{jn\theta} \quad (1.12)$$

e) ENESIMA RAIZ

Para encontrar las n ésimas raices de un número complejo se emplea la formula siguiente

$$z^{1/n} = \left[|z| e^{j\theta} \right]^{1/n} = |z|^{1/n} e^{\frac{j(\theta + 2\pi k)}{n}}$$

$$k = 0, 1, 2, 3, \dots, n - 1$$

APENDICE II

FUNCIONES SENOIDALES

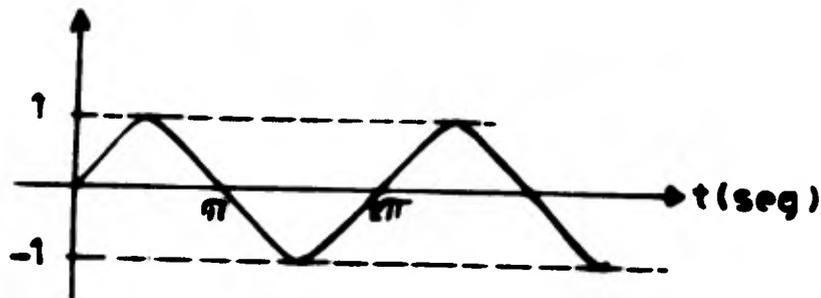
A las funciones seno y coseno se les llama funciones senoidales. Estas funciones son periódicas, con un periodo igual a 2π rad y una amplitud máxima igual a la unidad.

Sea la siguiente función

$$f(t) = \text{sen } t$$

$$\text{frecuencia} = 1 \text{ ciclo/seg}$$

$$\text{Amplitud} = 1$$



Las funciones senoidales pueden tener amplitud diferente de la unidad y periodo distinto de 2π , cuando se ven afectadas por los siguientes factores:

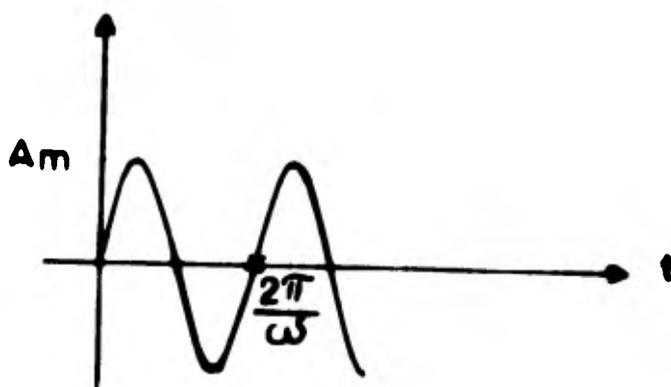
$$\text{Sea } f(t) = A_m \text{ Sen } 2\pi ft$$

a) $A_m =$ factor de amplitud

b) $2\pi f =$ constante de periodicidad

ya que $\omega = 2\pi f$

$$f(t) = A_m \text{ sen } \omega t$$



Esta función repite sus valores cuando ωt se incrementa en 2π por lo tanto:

$$\omega T = 2\pi ; \quad T = \frac{2\pi}{\omega} ; \quad T = \text{periodo}$$

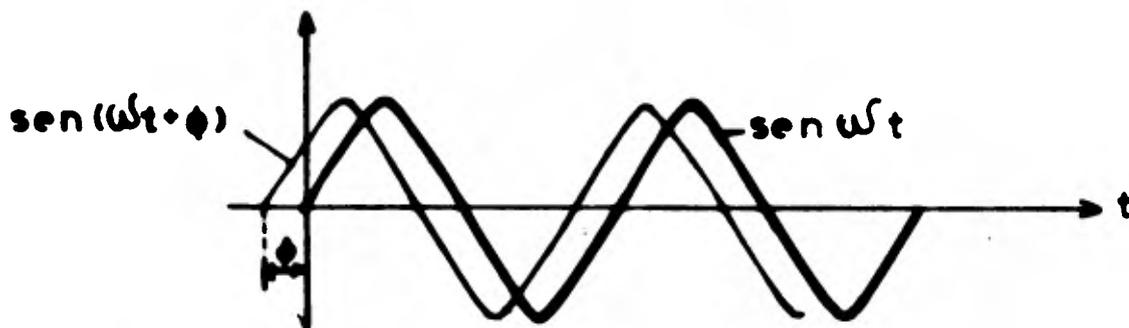
ANGULO DE DEFASAMIENTO.

Sean las siguientes funciones senoidales

$$f_1(t) = \text{sen } \omega t$$

$$f_2(t) = \text{sen } (\omega t + \phi)$$

Se dice que la función $f_2(t)$ esta defazada con respecto a $f_1(t)$ por un ángulo ϕ .



FASORES. En el análisis del estudio senoidal permanente es necesario realizar operaciones con funciones senoidales; trabajar con estas directamente en el dominio del tiempo es muy complicado.

Una herramienta muy útil para realizar facilmente operaciones con funciones senoidales es el fasor.

Un fasor es un vector giratorio en el plano complejo y nos sirve para representar funciones senoidales.

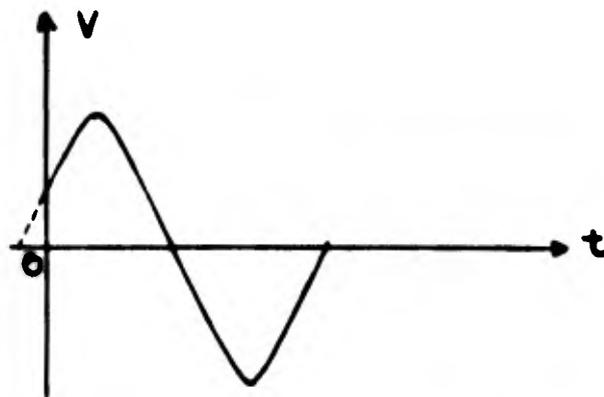
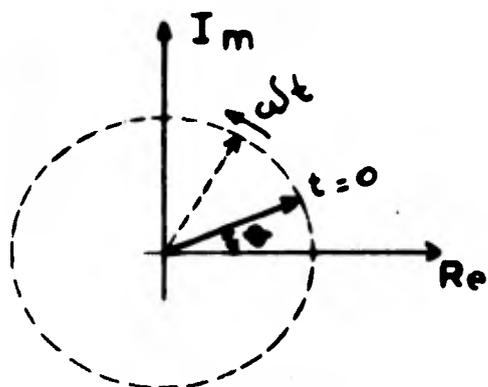
Sea la función $V(t) = V_m \text{sen } (\omega t + \phi)$.

Donde V_m es la amplitud máxima de la tensión $V(t)$.

Esta función se puede representar como:

$$v(t) = \text{Im} \left\{ V_m e^{j\omega t} e^{j\theta} \right\}$$

lo que en el plano complejo se representa como se muestra en la siguiente figura:



Si tomamos el instante en que $t = 0$ $v(t) = I_m \{v_m e^{j\theta}\}$

A el complejo $V = v_m e^{j\theta}$ se le llama fasor, se representa de la siguiente manera:

$$V = v_m \angle \theta$$

Como se ve en la notación un fasor nos da información sobre la magnitud y la fase de la función senoidal en un instante de tiempo (generalmente en $t = 0$).

La facilidad que ganamos con el uso de fasores se basa en una propiedad de las funciones senoidales según la cual, la suma de cualquier número de funciones senoidales de igual frecuencia y de sus derivadas es otra función senoidal de igual frecuencia. Debido a esta propiedad, los fasores de ondas senoidales y sus derivadas se pueden sumar o restar vectorialmente.

Sean las funciones senoidales siguientes:

$$v_1(t) = V_{1m} \text{ sen } (\omega t + \theta)$$

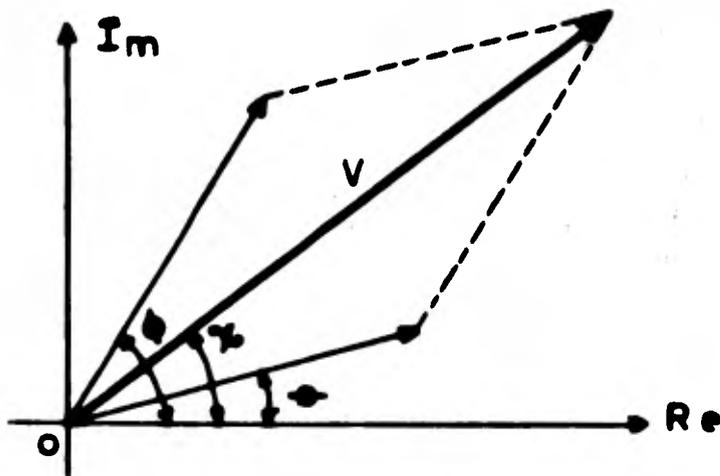
$$v_2(t) = V_{2m} \text{ sen } (\omega t + \phi)$$

en forma fasorial quedan:

$$V_1 = V_{1m} \underline{\theta}$$

$$V_2 = V_{2m} \underline{\phi}$$

La suma de $v_1(t) + v_2(t) = v(t)$, usando fasores $V \underline{\psi} = V_1 \underline{\theta} + V_2 \underline{\phi}$.



$$v \underline{\psi} = \left[V_1 \cos \theta + V_2 \cos \phi \right] + j \left[V_1 \sen \theta + V_2 \sen \phi \right]$$

Para pasar de la forma fasorial a la senoidal en función del tiempo, dado que la frecuencia se conserva, solo necesitamos la magnitud y la fase resultantes, información que nos da el fasor resultante, entonces:

$$v(t) = V_m \sen (\omega t + \psi)$$

BIBLIOGRAFIA.

- MENIETTI R.E, CAPACITOR CONTROLS AND THEIR APPLICATIONS-SANGANO ELECTRIC COMPANY. USA.
- NEMA (NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURES ASSOCIATION), PUE No. CP.1-1971-STANDARDS PUBLICATIONS-SHUNT CAPACITORS.-- 155 FAST, 44TH. STREET NEW YORK 10017, USA.
- INDUSTRIAL POWER SYSTEMS HAND BOOK-DONALD BEEMAN.
- CAPACITORES DE POTENCIA-DR. ALFREDO NAVARRO CRESPO-BAL-- MEC, S. A.
- EMEPSA, INFORMACIONES TECNICAS-PN. 3217/ESI 1977.
- CCONNIE (COMITE CONSULTIVO NACIONAL DE NORMALIZACION DE LA INDUSTRIA ELECTRICA). NORMA: CAPACITORES PARA LA CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA 1975.
- CAPACITORES INDUSTRIALES PARA LA CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA-SPRAGUE, CAT. No. G2-S.
- FUNDAMENTOS DE ELECTROTECNIA-M KUZNETSOV.
- TEORIA DE SISTEMAS Y CIRCUITOS-VICTOR GEREZ G.-MA.MURRAY-LASSO-RSI.
- THE ABC POWER FACTOR-EM SYNCHRONIEER-No. 200 SYN 50.
- THE ABC OF SYNCHRONOUS MOTORS-EM SYNCHRONI ZER-No. 200 -- SYN 42.
- REDES ELECTRICAS I - JACINTO VIQUEIRA.