

23  
2ej



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN**

**"ANALISIS Y ESTUDIO DE LA CORRECCION DE  
POTENCIA REACTIVA EN EL HOSPITAL CENTRAL  
NORTE DE PEMEX"**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**P R E S E N T A :**

**DANIEL ALFONSO GARCIA TORRES**

ASESOR: ING. JOSE JUAN CONTRERAS ESPINOSA  
COASESOR: ING. GLORIA VILLANUEVA AGUILAR

270036

CUAUTITLAN IZCALLI, ESTADO DE MEXICO.

1999

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
 FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
 UNIDAD DE ADMINISTRACION ESCOLAR  
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.  
 FACULTAD DE ESTUDIOS  
 SUPERIORES CUAUTITLAN

UNIVERSIDAD NACIONAL  
 AVENIDA DE  
 MEXICO

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
 DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN  
 P R E S E N T E.



ATN.: Q. M. DEL CARMEN GARCIA MIJARES  
 JEFE DEL DEPARTAMENTO.

Con base al articulo 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a Usted que revisamos el TRABAJO de TESIS con el nombre de:

"Análisis y estudio de la corrección de potencia reactiva en el Hospital Central Norte de Pemex".

que presenta el pasante: GARCIA TORRES DANIEL ALFONSO  
 con número de cuenta : 8901331-3 para obtener el Título de :

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E.  
 "POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
 Cuautitlán Izc., México, a 13 de Octubre de 1998

Presidente	<u>ING. JOSE JUAN CONTRERAS ESPINOSA</u>	
Vocal	<u>ING. ESTEBAN CORONA ESCAMILLA</u>	
Secretario	<u>ING. JOSE LUZ HERNANDEZ CASTILLO</u>	
1er. Sup.	<u>ING. JORGE ALTAMIRA IBARRA</u>	
2do. Sup.	<u>ING. JUAN GONZALEZ VEGA</u>	

---

# AGRADECIMIENTOS:

LE DOY GRACIAS A DIOS, POR PERMITTERME LLEGAR A VER CONCLUIDA  
ESTA META.

A MI MADRE, MARIA TORRES, POR ALENTARME DURANTE TODOS  
ESTOS AÑOS A CONTINUAR, PORQUE FUISTE Y HAS SIDO EL PILAR DE  
NUESTRA FAMILIA, SIN IMPORTAR LAS CIRCUNSTANCIAS, PORQUE SIN TU  
APOYO Y COMPRENSIÓN NO HUBIERA PODIDO ALCANZAR ESTE  
OBJETIVO. GRACIAS MAMA.

A LA MEMORIA DE MI PADRE, CELESTINO GARCIA PORQUE FUISTE UN  
HOMBRE LEAL, VALIENTE Y APEGADO A TUS PRINCIPIOS QUE ANQUE NO  
SE ENCUENTRA CON NOSOTROS, SIEMPRE VIVIRA EN NUESTRO  
CORAZON.

A MIS HERMANAS: A MARY, A MAYELA Y MARTHA, QUE SIEMPRE ME  
APOYARON INCONDICIONALMENTE A CONTINUAR ADELANTE, DURANTE  
ESTOS AÑOS DE ESTUDIO.

A MIS MAESTROS, POR COMPARTIR SUS CONOCIMIENTOS Y  
EXPERIENCIAS DURANTE MI FORMACION PROFESIONAL.

---

---

A LAS PERSONAS QUE CON SU APOYO HICIERON POSIBLE EL  
DESARROLLO DE ESTE TRABAJO:

AL ING. JOSE JUAN CONTRERAS ESPINOSA

AL ING. CARLOS PEREZ MORALES

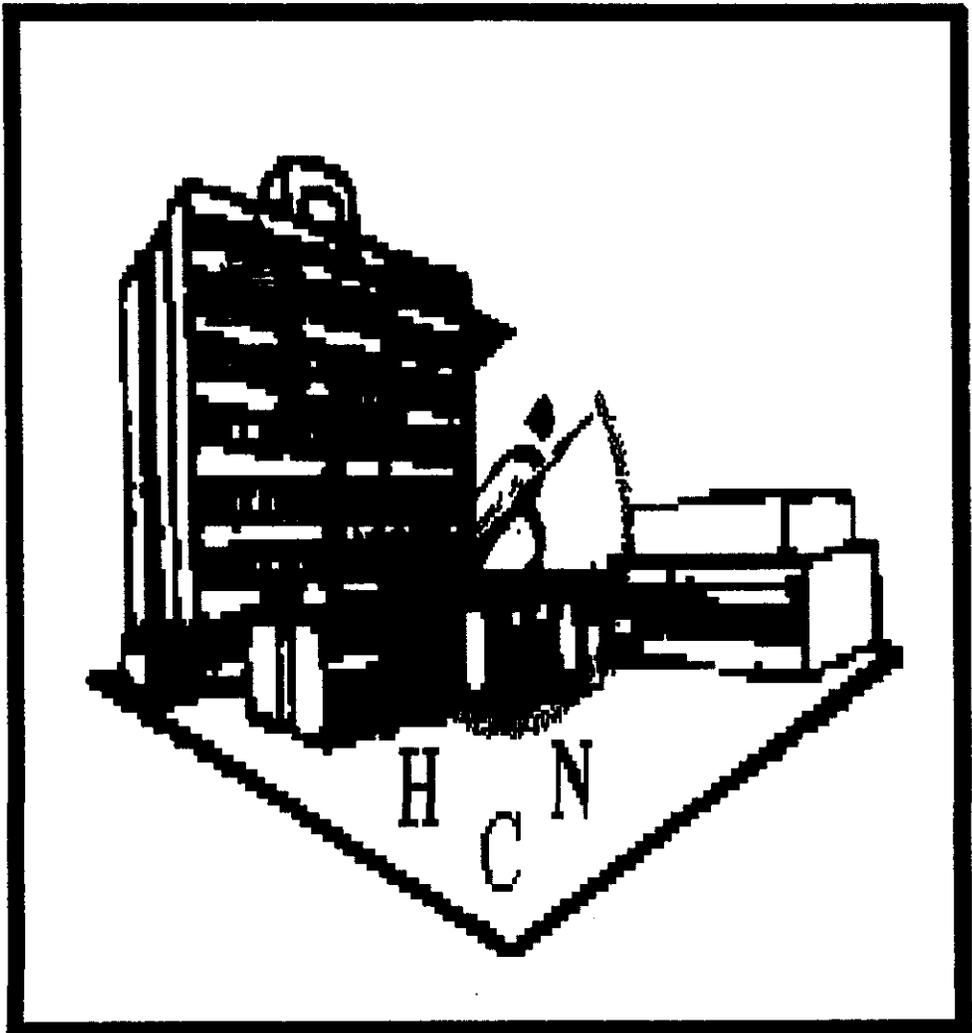
YA QUE SIN SU APOYO, NO HUBIERA SIDO POSIBLE EL DESARROLLO  
DE ESTE TRABAJO.

A LA UNAM Y ESPECIALMENTE A LA FES-C. POR PERMITIRME FORMAR  
PARTE, DE ESTA GRAN COMUNIDAD UNIVERSITARIA Y AL PERMITIRME  
FORJARME, COMO PROFESIONAL.

A MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS DE LA FACULTAD, PORQUE  
COMPARTIMOS JUNTOS NUESTRA FORMACIÓN, PORQUE SIEMPRE NOS  
APOYAMOS A SEGUIR ADELANTE, A CAMINAR UN PASO MAS.

---

HOSPITAL CENTRAL NORTE  
DE  
CONCENTRACION NACIONAL



# índice

	<b>PAGINA</b>
<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
<b>➤ CAPITULO UNO.</b>	
<b>CONCEPTOS BASICOS</b>	
1.1 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE ENERGIA ELÉCTRICA.....	6
1.2 POTENCIA ELÉCTRICA; ACTIVA Y REACTIVA.....	18
1.3 DEFINICION DEL TERMINO FACTOR DE POTENCIA.....	25
1.4 CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA.....	29
1.5 METODOS DE MEDICION DEL FACTOR DE POTENCIA.....	42
<b>➤ CAPITULO DOS.</b>	
<b>BENEFICIOS AL CORREGIR EL BAJO FACTOR DE POTENCIA</b>	
2.1 BENEFICIOS AL CORREGIR EL F.P.....	46
2.2 REDUCCION DE PERDIDAS EN LOS CABLES.....	49
2.3 REDUCCION DE PERDIDAS EN TRANSFORMADORES.....	53
2.4 MEJOR REGULACION DE VOLTAJE EN TRANSFORMADORES.....	55
2.5 LIBERACION DE POTENCIA APARENTE EN EL TRANSFORMADOR.....	57
2.6 MENOR CAÍDA DE VOLTAJE EN LOS CONDUCTORES.....	59
<b>➤ CAPITULO TRES.</b>	
<b>COMPENSACION DEL FACTOR DE POTENCIA MEDIANTE BANCOS DE CAPACITORES.</b>	
3.1 EL CAPACITOR.....	61
3.1.1 CARGA Y CAPACIDAD DEL CAPACITOR.....	62
3.1.2 DEPENDENCIA DE LA CAPACITANCIA.....	63
3.1.3 CAPACITOR EN TENSION CONTINUA.....	65
3.1.4 CAPACITOR EN TENSION ALTERNA.....	66
3.1.5 EL CAPACITOR MONOFASICO.....	67
3.2 CONEXIÓN DE CAPACITORES EN PARALELO.....	68
3.2.1 CAPACITOR TRIFASICO EN CONEXIÓN EN DELTA.....	68
3.2.2 CAPACITOR TRIFASICO EN CONEXIÓN ESTRELLA.....	70
3.2.3 DESCARGA DE CAPACITORES.....	72
3.2.4 FACTOR DE PERDIDA, POTENCIA DE PERDIDA.....	74

## TESIS

---

3.3	CLASIFICACION DE CAPACITORES DE POTENCIA SEGÚN NOM-J-203 1980 .....	75
3.4	ESPECIFICACIONES NECESARIAS DE UN CAPACITOR NOM-J203-1980.....	79
3.5	TIPOS DE COMPENSACION.....	83
3.6	BANCOS DE CAPACITORES.....	87
3.7	PROTECCION DE LOS BANCOS DE CAPACITORES.....	101
3.8	OPERACIÓN DE LOS CAPACITORES.....	109

### > CAPITULO CUATRO

#### CONTROL DE ARMONICAS EN SISTEMAS ELECTRICOS INDUSTRIALES

4.1	DEFINICION DE ARMONICA.....	110
4.2	FUENTES DE ARMONICAS.....	113
4.3	NORMATIVIDAD SOBRE EL PROBLEMA DE ARMONICAS.....	117
4.4	FILOSOFIA DE LA NORMA IEEE-519.....	118
4.5	EFFECTOS DE LAS ARMONICAS EN LOS CAPACITORES.....	125
4.6	CONDICIONES PARA REALIZAR UN ESTUDIO SOBRE ARMONICAS.....	130
4.7	FILTROS DE ARMONICAS.....	132

### > CAPITULO CINCO.

#### CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA EN EL HOSPITAL CENTRAL NORTE DE PEMEX.

5.1	ANALISIS Y CALCULO DE LA POTENCIA NECESARIA DEL BANCO DE CAPACITORES PARA CORREGIR EL F.P.....	138
5.2	MEDICIONES EFECTUADAS.....	141
5.3	EQUIPO A INSTALAR.....	144
5.3.1	COSTO DE LA INSTALACIÓN.....	145
5.3.2	BENEFICIOS ADICIONALES.....	146
	CONCLUSIONES.....	150
	BIBLIOGRAFIA.....	152

---

energía eléctrica. Así mismo la compañía suministradora proporciona una bonificación cuando se tiene un factor de potencia mayor al 90%.

Adicionalmente a la eliminación de la multa, el elevar el factor de potencia en una instalación eléctrica redundará en beneficios de varios tipos como; reducción de pérdidas en conductores eléctricos, reducción de pérdidas en transformadores, mejor regulación de voltaje en transformadores, menor caída de voltaje en los conductores, liberación de potencia aparente en el transformador, mejor regulación de voltaje en el sistema y en general, alivio de la capacidad del sistema existente.

### **Buenas razones para ahorrar energía eléctrica.**

La justificación de las acciones para ahorrar energía eléctrica puede englobarse desde tres puntos de vista:

1. Beneficios para el usuario.
2. Beneficios para las empresas relacionadas con la fabricación y comercialización de equipo ahorrador de energía.
3. Beneficios para las compañías suministradoras de energía eléctrica y para la sociedad y el país en su conjunto.

#### **1. Beneficios para el usuario.**

Desde el punto de vista del usuario, el ahorro de energía es una inversión muy rentable, la estructura de la facturación eléctrica depende del tipo de usuario, con lo que se determina la tarifa contratada.

Generalmente está formada por cuatro conceptos principales que son: por consumo de energía eléctrica (kw/h), por cargos fijos (mantenimiento por ejemplo), por bajo factor de potencia (cuando es menor a 0.9), y por demanda máxima (kW). Ahorrar energía incide favorablemente en los conceptos anteriores porque tiende a reducir la corriente eléctrica, aunque no afecta los cargos fijos.

El caso del factor de potencia es un caso particular, porque así como puede representar un recargo de hasta el 120% también puede convertirse en una bonificación de 2.5%.

Aunque en algunos equipos eléctricos existen pérdidas mecánicas (por fricción, inercia, etc.), puede decirse que el ahorro de energía en sistemas eléctricos gira alrededor de una cuestión fundamental: de la cantidad de energía disipada al medio en forma de calor.

Este proceso es un fenómeno irreversible, ya que no hay forma de hacer que esa energía disipada regrese a la red, de manera que es una pérdida absoluta; estas pérdidas pueden ser de origen eléctrico (efecto Joule) o magnético (histéresis y corrientes parásitas).

Las pérdidas debidas al efecto Joule son proporcionales al cuadrado de la corriente eficaz y en la práctica son por mucho las más importantes.

De acuerdo con lo anterior se deduce que una disminución de la corriente favorece en general a la eficiencia de los sistemas eléctricos; existen por supuesto excepciones: un motor o un transformador trabajando en vacío manejan corrientes mínimas sin embargo su eficiencia es cero, ya que no transfieren energía alguna a la carga.

En el caso de los conductores es distinto, ya sea un delgado alambre magneto o un grueso cable de potencia, la resistencia depende de su calibre, del material, de la longitud, de la frecuencia y de la temperatura a la que trabaje. La temperatura a su vez está determinada por la técnica de instalación y el ambiente en que opera, pero sobre todo de la corriente que maneje. Un conductor que conduzca corriente alta se calentará y con ello elevará sus pérdidas.

Por ejemplo un alambre de cobre que debido a la corriente que trabaje a 100°C, presentará una resistencia 1.314 veces mayor que cuando se encuentra a 20°C sin conducir corriente. Esto implica que las pérdidas por efecto Joule en dicho conductor aumentarán 31.4% por culpa del efecto térmico de la corriente. Pero éste no es el único inconveniente; el aislamiento del conductor sufrirá las consecuencias de este

calentamiento. En la práctica se considera que por cada 10°C de incremento en la temperatura promedio de operación la resistencia de aislamiento y la vida útil se reducen a la mitad, con inevitables consecuencias negativas en la seguridad y en los costos de mantenimiento por mano de obra y material. Esto es válido también para motores, reguladores, arrancadores, reactores, balastos, transformadores, etc.

Independientemente del efecto térmico de la corriente al circular por los conductores, las pérdidas variarán en forma cuadrática con respecto a dicha corriente. Por tanto, si la corriente se duplica las pérdidas se cuadruplican; en cambio si la corriente se reduce por ejemplo 30% las pérdidas decrecerán 51% y si se reduce 60% las pérdidas bajarán 84%.

Otro beneficio que se obtiene al reducir la corriente es la mejora en la regulación de tensión, ya que a mayor corriente mayor caída de voltaje. Por ejemplo, ignorando el efecto térmico, si la corriente se duplica, la caída de tensión también aumenta al doble, pero si la corriente se reduce 20% la caída decrece también 20%, es decir, la caída de tensión varía en la misma forma en que varía la corriente.

Una reducción de la corriente en diversos puntos de la instalación eléctrica reducirá la corriente de todo el sistema, reflejándose directamente en la demanda instantánea y por lo tanto en la demanda máxima facturable, ya que ésta es función del voltaje, del número de fases, del factor de potencia y de dicha corriente.

Reducir la corriente y por tanto las pérdidas proporcionan otro beneficio adicional: disminuir la carga térmica. Cada kWh de pérdidas requiere 3,412 BTU de aire acondicionado, como cada tonelada de aire acondicionado equivale a 12,000 BTU, cada 3.5 kWh evitados ahorran una tonelada de aire acondicionado.

Ahorrar energía eléctrica, ya sea a través de la corrección del factor de potencia, del uso del equipo altamente eficiente, de una mejor filosofía de operación y control o por cualquier otro medio, también permite ahorrar en cableado para obras nuevas o existentes, la capacidad de los transformadores también puede ser disminuida, así como los equipos de protección, mantenimiento, etc.

Sin embargo el beneficio más evidente e inmediato es la disminución del importe de la factura eléctrica a través de la optimización del consumo, demanda máxima y factor de potencia alcanzados al ahorrar energía eléctrica.

*Para el usuario industrial, la energía eléctrica representa cierto porcentaje de sus costos de producción, que en algunos casos puede ser muy importante.*

Existe un índice energético llamado "Intensidad Energética", que relaciona la energía consumida para lograr una unidad de producto terminado, por ejemplo joules/lanta o kilocalorías/tonelada de cemento. Con las expectativas del TLC las empresas nacionales tienen que mantener o elevar la calidad de sus productos pero a un costo igual o menor al internacional para poder competir con las empresas extranjeras.

Resulta evidente que las acciones encaminadas para lograr ahorros de energía eléctrica son cada día más necesarias, por fortuna son también cada día más factibles y más rentables.

## INTRODUCCION

La energía es la fuerza que mueve al moderno mundo industrial; sin ella, las fabricas se detendrían y economías enteras entrarían en crisis. Por eso es vital saber administrarla.

Solo aquellos que hacen el mejor uso de la energía, pueden prosperar en un mundo cada vez más competitivo. Y ahorrar energía es una de las claves para abatir costos y poder competir a la par de industrias de todo el mundo, en una economía que tiende a la globalidad inevitablemente.

El incremento del uso de equipo eléctrico más complejo, así como la demanda de una mayor seguridad, confiabilidad y ahorro de energía en las plantas industriales ha motivado la necesidad de actualizar el estudio de la corrección del factor de potencia, mediante capacitores de potencia y la información necesaria para la aplicación del equipo.

La gran mayoría de los equipos eléctricos, como motores, transformadores, homós de inducción, lamparas fluorescentes, soldadoras etc. Consumen tanto potencia activa como reactiva. Este consumo de potencia de potencia reactiva inductiva es también causante del incremento de pérdidas y por consecuencia de la pérdida de energía activa.

Un factor de potencia bajo significa una eficiencia eléctrica también baja, que es una situación costosa, porque el consumo real de energía es menor.

El modo más simple y más económico para mejorar el factor de potencia es mediante capacitores de potencia. Los capacitores proporcionan la corriente reactiva de magnetización necesaria, para los motores y demás equipos, desplazando entonces la corriente reactiva suministrada por las líneas de alimentación de energía de la compañía.

El bajo factor de potencia menor a 90% lo penaliza la compañía suministradora, con una multa sobre la base de un porcentaje sobre la facturación total del consumo de

energía eléctrica. Así mismo la compañía suministradora proporciona una bonificación cuando se tiene un factor de potencia mayor al 90%.

Adicionalmente a la eliminación de la multa, el elevar el factor de potencia en una instalación eléctrica redonda en beneficios de varios tipos como; reducción de pérdidas en conductores eléctricos, reducción de pérdidas en transformadores, mejor regulación de voltaje en transformadores, menor caída de voltaje en los conductores, liberación de potencia aparente en el transformador, mejor regulación de voltaje en el sistema y en general, alivio de la capacidad del sistema existente.

### **Buenas razones para ahorrar energía eléctrica.**

La justificación de las acciones para ahorrar energía eléctrica puede englobarse desde tres puntos de vista:

1. Beneficios para el usuario.
2. Beneficios para las empresas relacionadas con la fabricación y comercialización de equipo ahorrador de energía.
3. Beneficios para las compañías suministradoras de energía eléctrica y para la sociedad y el país en su conjunto.

#### **1. Beneficios para el usuario.**

Desde el punto de vista del usuario, el ahorro de energía es una inversión muy rentable, la estructura de la facturación eléctrica depende del tipo de usuario, con lo que se determina la tarifa contratada.

Generalmente está formada por cuatro conceptos principales que son: por consumo de energía eléctrica (kw/h), por cargos fijos (mantenimiento por ejemplo), por bajo factor de potencia (cuando es menor a 0.9), y por demanda máxima (kW). Ahorrar energía incide favorablemente en los conceptos anteriores porque tiende a reducir la corriente eléctrica, aunque no afecta los cargos fijos.

El caso del factor de potencia es un caso particular, porque así como puede representar un recargo de hasta el 120% también puede convertirse en una bonificación de 2.5%.

Aunque en algunos equipos eléctricos existen pérdidas mecánicas (por fricción, inercia, etc.), puede decirse que el ahorro de energía en sistemas eléctricos gira alrededor de una cuestión fundamental: de la cantidad de energía disipada al medio en forma de calor.

Este proceso es un fenómeno irreversible, ya que no hay forma de hacer que esa energía disipada regrese a la red, de manera que es una pérdida absoluta; estas pérdidas pueden ser de origen eléctrico (efecto Joule) o magnético (histéresis y corrientes parásitas).

Las pérdidas debidas al efecto Joule son proporcionales al cuadrado de la corriente eficaz y en la práctica son por mucho las más importantes.

De acuerdo con lo anterior se deduce que una disminución de la corriente favorece en general a la eficiencia de los sistemas eléctricos; existen por supuesto excepciones: un motor o un transformador trabajando en vacío manejan corrientes mínimas sin embargo su eficiencia es cero, ya que no transfieren energía alguna a la carga.

En el caso de los conductores es distinto, ya sea un delgado alambre magneto o un grueso cable de potencia, la resistencia depende de su calibre, del material, de la longitud, de la frecuencia y de la temperatura a la que trabaje. La temperatura a su vez está determinada por la técnica de instalación y el ambiente en que opera, pero sobre todo de la corriente que maneje. Un conductor que conduzca corriente alta se calentará y con ello elevará sus pérdidas.

Por ejemplo un alambre de cobre que debido a la corriente que trabaje a 100°C, presentará una resistencia 1.314 veces mayor que cuando se encuentra a 20°C sin conducir corriente. Esto implica que las pérdidas por efecto Joule en dicho conductor aumentarán 31.4% por culpa del efecto térmico de la corriente. Pero éste no es el único inconveniente; el aislamiento del conductor sufrirá las consecuencias de este

calentamiento. En la práctica se considera que por cada 10°C de incremento en la temperatura promedio de operación la resistencia de aislamiento y la vida útil se reducen a la mitad, con inevitables consecuencias negativas en la seguridad y en los costos de mantenimiento por mano de obra y material. Esto es válido también para motores, reguladores, arrancadores, reactores, balastos, transformadores, etc.

Independientemente del efecto térmico de la corriente al circular por los conductores, las pérdidas variarán en forma cuadrática con respecto a dicha corriente. Por tanto, si la corriente se duplica las pérdidas se cuadruplican; en cambio si la corriente se reduce por ejemplo 30% las pérdidas decrecerán 51% y si se reduce 60% las pérdidas bajarán 84%.

Otro beneficio que se obtiene al reducir la corriente es la mejora en la regulación de tensión, ya que a mayor corriente mayor caída de voltaje. Por ejemplo, ignorando el efecto térmico, si la corriente se duplica, la caída de tensión también aumenta al doble, pero si la corriente se reduce 20% la caída decrece también 20%, es decir, la caída de tensión varía en la misma forma en que varía la corriente.

Una reducción de la corriente en diversos puntos de la instalación eléctrica reducirá la corriente de todo el sistema, reflejándose directamente en la demanda instantánea y por lo tanto en la demanda máxima facturable, ya que ésta es función del voltaje, del número de fases, del factor de potencia y de dicha corriente.

Reducir la corriente y por tanto las pérdidas proporcionan otro beneficio adicional: disminuir la carga térmica. Cada kWh de pérdidas requiere 3,412 BTU de aire acondicionado, como cada tonelada de aire acondicionado equivale a 12,000 BTU, cada 3.5 kWh evitados ahorran una tonelada de aire acondicionado.

Ahorrar energía eléctrica, ya sea a través de la corrección del factor de potencia, del uso del equipo altamente eficiente, de una mejor filosofía de operación y control o por cualquier otro medio, también permite ahorrar en cableado para obras nuevas o existentes, la capacidad de los transformadores también puede ser disminuida, así como los equipos de protección, mantenimiento, etc.

Sin embargo el beneficio más evidente e inmediato es la disminución del importe de la factura eléctrica a través de la optimización del consumo, demanda máxima y factor de potencia alcanzados al ahorrar energía eléctrica.

Para el usuario industrial, la energía eléctrica representa cierto porcentaje de sus costos de producción, que en algunos casos puede ser muy importante.

Existe un índice energético llamado "Intensidad Energética", que relaciona la energía consumida para lograr una unidad de producto terminado, por ejemplo joules/lanta o kilocalorías/tonelada de cemento. Con las expectativas del TLC las empresas nacionales tienen que mantener o elevar la calidad de sus productos pero a un costo igual o menor al internacional para poder competir con las empresas extranjeras.

Resulta evidente que las acciones encaminadas para lograr ahorros de energía eléctrica son cada día más necesarias, por fortuna son también cada día más factibles y más rentables.

## CAPITULO UNO CONCEPTOS BASICOS

### 1.1 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE ENERGIA ELECTRICA.

En la teoría de circuitos se definen tres tipos básicos de elementos pasivos, que son: el resistivo, el capacitivo y el inductivo. De estos tres tipos básicos se pueden formar las combinaciones necesarias para mejor representar a un elemento real.

Cada uno de estos elementos básicos pasivos tiene asociado un parámetro que representa una medida de su característica eléctrica.

Así un elemento resistivo tiene asociado el parámetro *resistencia* cuya definición se puede establecer como sigue:

**Resistencia**, es la propiedad que tienen los elementos de oponerse al paso de la corriente eléctrica, su símbolo es la letra R.

Su relación voltaje-corriente de acuerdo con la ley de ohm es:

$$V = RI \quad (1)$$

Donde

V = voltaje aplicado en sus terminales

I = corriente que circula entre sus terminales

Esquemáticamente se tiene:

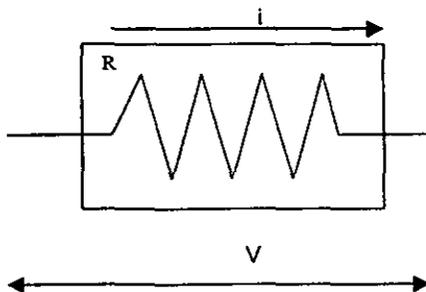


Fig. 1-1. Relación voltaje-corriente de un elemento resistivo.

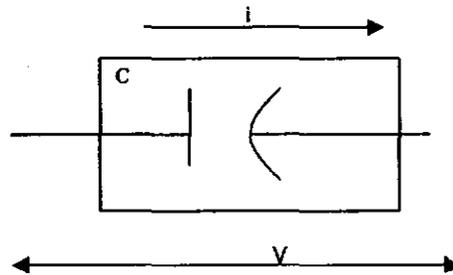
Un elemento capacitivo tiene asociado el parámetro capacitancia cuya definición se puede establecer como:

**Capacitancia**, es la propiedad que tienen los elementos de almacenar energía en forma de campo eléctrico. Su símbolo es la letra C.

Su relación de voltaje corriente de acuerdo con la ley de ohm es:

$$I = C \frac{dv}{dt} \quad (2)$$

Esquemáticamente se tiene:



**Fig. 1-2. Relación voltaje-corriente de un elemento capacitivo.**

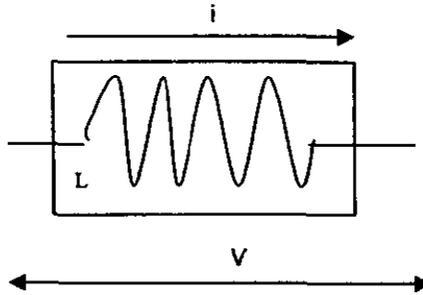
Un elemento inductivo tiene asociado el parámetro inductancia cuya definición se puede establecer como:

**Inductancia** es la propiedad que tienen los elementos de almacenar energía en forma de campo magnético. Su símbolo es la letra L.

La relación voltaje- corriente esta dada por:

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (3)$$

Esquemáticamente se tiene:



**Fig. 1-3. Relación voltaje-corriente de un elemento inductivo.**

El comportamiento de los elementos básicos depende del tipo de señal al que sean sometidos. Existe una gran variedad de tipos de señales que se pueden generar y aplicar a los elementos de un circuito. Sin embargo, hay dos tipos que son importantes para el ingeniero mecánico electricista. La señal de corriente continua y la señal de corriente alterna.

Se define como una señal de corriente continua aquella que no varía su magnitud y signo a lo largo del tiempo. Para este tipo de señal se tiene que:

$$i = \text{cte} \quad \text{y} \quad v = \text{cte.}$$

Una señal de corriente alterna es aquella que varía su magnitud y signo a lo largo del tiempo. Los sistemas de energía eléctrica actuales son sistemas eléctricos que operan principalmente con señales de corriente alterna.

La señal de corriente alterna que interesa analizar es una señal periódica uniforme que varía su forma y signo a una frecuencia regular y que puede ser representada por una onda senoidal. Esto es:

$$I(t) = I_m \text{ sen } \omega t \quad (4)$$

$$V(t) = V_m \text{ sen } \omega t \quad (5)$$

Donde :

$I_m$  y  $V_m$  = Amplitudes máximas de las ondas de corriente y voltaje.

$\omega$  = Frecuencia de las señales.

Interesa analizar el comportamiento de los elementos básicos ante este tipo de corriente.

Supóngase primeramente que la señal aplicada a los elementos es del tipo continuo. Si se asume que se aplica una diferencia de potencial constante.

A) Para una resistencia. Supóngase primeramente que la señal aplicada a los elementos es del tipo continuo. Si se asume que se aplica una diferencia de potencial entre las terminales del resistor y la respuesta del elemento es la corriente que circulara a través de el, de la ecuación (1) se tiene que:

$$I = \frac{V}{R} \quad (6)$$

Pero como  $v = \text{cte}$ . Entonces  $i = \text{cte}$ .

Esto indica que la corriente que circula a través de un resistor al aplicar una señal de voltaje constante será también constante. La respuesta es lineal.

Ahora supóngase que la señal de voltaje aplicada al elemento resistivo es del tipo alterno.

Sea  $V(t) = V_m \text{ sen } \omega t$  de la ecuación 1 se tiene que la respuesta del elemento será:

$$i(t) = \frac{1}{R} (V_m \text{ sen } \omega t)$$

$$i(t) = \frac{V_m}{R} \text{ sen } \omega t \quad (7)$$

$$i(t) = I_m \sin wt$$

Donde :

$$I_m = \frac{V_m}{R} \quad (8)$$

De la ecuación 7 se puede observar que para un elemento puramente resistivo las señales de corriente y voltaje están en fase la una con la otra. Las cargas resistivas toman corrientes que se encuentran en fase con el voltaje aplicado, y la energía eléctrica que consumen se transforma en trabajo mecánico, en calor o en cualquier otra forma de energía.

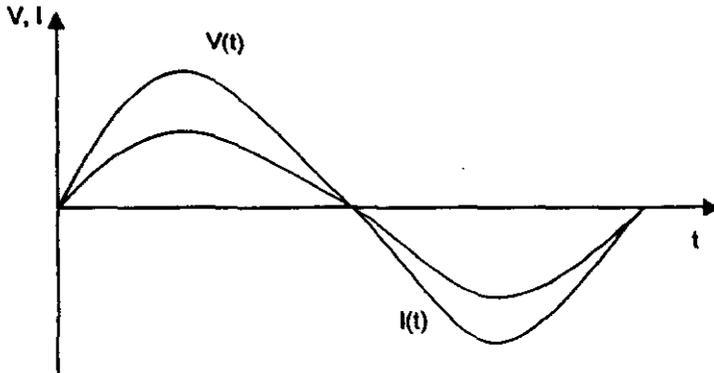


Fig. 1-4. Respuesta de un elemento resistivo ante una señal de corriente alterna.

B) Para el caso del elemento capacitivo se tiene el siguiente análisis.

Suponiendo primero una señal del tipo continuo:  $v = cte.$

De la ecuación 2 se puede ver que la respuesta del elemento capacitivo será:

$$i(t) = C \frac{dv}{dt} \quad (9)$$

La ecuación 9 indica que un capacitor al que se le aplica una señal del tipo continuo se comporta como un circuito abierto, es decir no permite el paso de la corriente eléctrica.

Ahora supóngase el caso de una señal del tipo alterno. Esto es  $V(t) = V_m \text{ sen } \omega t$ . De la ecuación anterior se tiene que la respuesta del elemento capacitivo será:

$$i(t) = C \frac{d}{dt} [V_m \text{ sen } \omega t] \quad (10)$$

$$i(t) = \omega C V_m \text{ cos } \omega t$$

Si se define a:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (11)$$

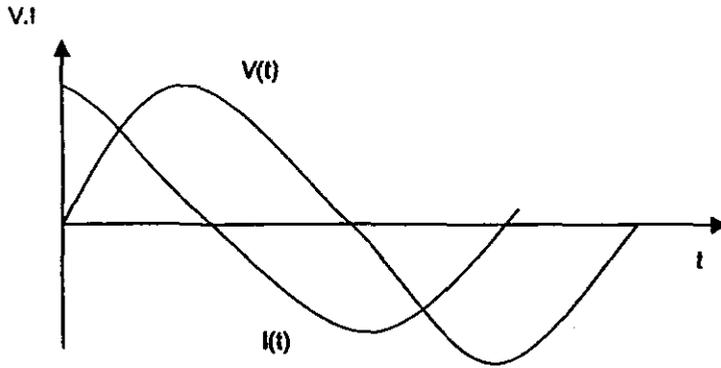
Como reactancia capacitiva entonces:

$$i(t) = \frac{V_m}{X_c} \text{ cos } \omega t \quad (12)$$

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

De la ecuación 12 se puede concluir que la respuesta de un elemento puramente capacitivo ante una señal del tipo alterno se encuentra defasada  $90^\circ$  hacia delante con

respecto a la señal de entrada. La figura 1.5 muestra gráficamente la respuesta de este elemento ante una señal de corriente alterna.



**Fig. 1-5. Respuesta de un elemento capacitivo ante una señal de corriente alterna.**

C) Para un elemento puramente inductivo el análisis es el siguiente:

Ante una señal del tipo alterno, la respuesta de un elemento puramente inductivo es la siguiente.

Sea  $v(t) = V_m \text{ sen } \omega t$  se tiene que:

$$i(t) = \frac{1}{L} \int (V_m \text{ sen } \omega t) dt \quad (13)$$

$$I(t) = \frac{V_m \cos \omega t}{\omega L} \quad (14)$$

$$i(t) = \frac{V_m}{\omega L} \text{ sen}(\omega t - 90^\circ) \quad (15)$$

Si se define a:

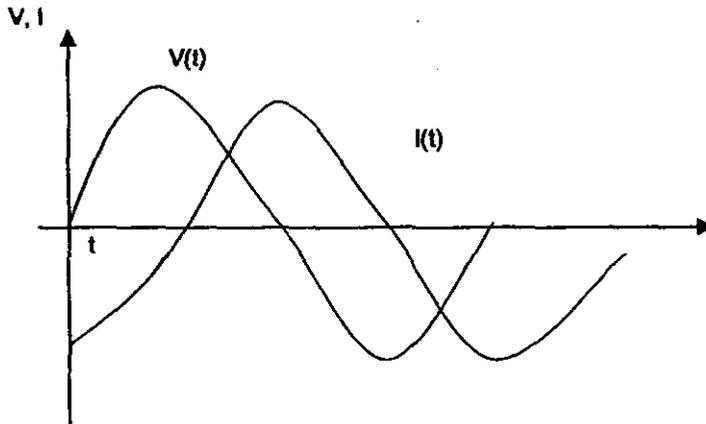
$$X_L = \omega L$$

Como reactancia inductiva, entonces la ecuación anterior se puede escribir como:

$$i(t) = \frac{V_m}{XL} \text{sen}(wt - 90^\circ) \quad (16)$$

$$i(t) = I_m \text{sen}(wt - 90^\circ) \quad (17)$$

La ecuación anterior nos indica que la respuesta de un elemento puramente inductivo se encuentra atrasada  $90^\circ$  con respecto a una señal de entrada del tipo alterno.

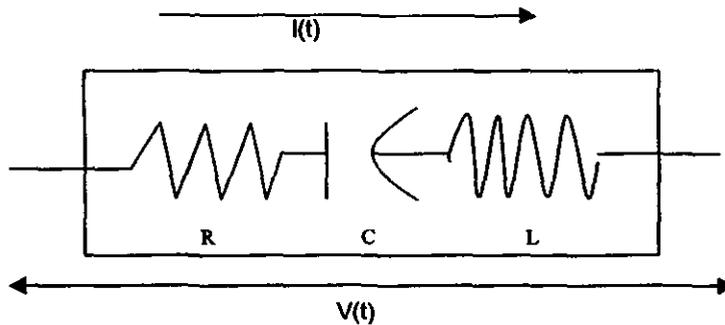


**Fig. 1-6. Respuesta de un elemento inductivo ante una señal de corriente alterna.**

No existen en la realidad elementos que tengan solamente resistencia, o capacitancia, o inductancia. Todos los elementos reales tienen los tres parámetros fundamentales aunque alguno de estos predomine sobre los otros.

D) el siguiente paso es analizar cual es la respuesta de un elemento de tipo general que resulta más representativo de un elemento real.

Sea  $v(t) = V_m \text{sen } wt$  una señal de voltaje alterno aplicado a un elemento del tipo general que tenga resistencia, inductancia y capacitancia como lo muestra la fig. 1.7



**Fig. 1.7 Elemento general sometido a la aplicación de una señal del tipo alterno.**

De la ley de voltajes de Kirchoff se puede establecer la siguiente ecuación:

$$V = V_r + V_L + V_c \quad (18)$$

Donde  $V_r$ ,  $V_L$  y  $V_c$  son los voltajes aplicados a los elementos resistivos, inductivos y capacitivos respectivamente se tiene que:

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt \quad (19)$$

Considerando las siguientes condiciones es posible obtener una solución.

- a) Como se trata de elementos conectados en serie, las corrientes de todos los elementos son iguales.
- b) Asumiendo que se trata de un elemento lineal, se puede establecer que el tipo de la Señal de respuesta  $i(t)$  será del mismo tipo que el de la entrada  $v(t)$ .  
Suponiendo que la señal de respuesta es:

$$i(t) = I_m \text{sen}(\omega t + \Phi) \quad (20)$$

Es decir, es del tipo senoidal como la entrada, pero defasada un ángulo  $\Phi$  que dependerá del efecto predominante del elemento general resistivo, capacitivo o inductivo.

Para comprobar esta aseveración. Se resuelve la ecuación (19) integro-diferencial resulta.

$$v(t) = R \operatorname{Im} \operatorname{sen}(wt + \Phi) + L \frac{d}{dt} [\operatorname{Im} \operatorname{sen}(wt + \Phi)] + \frac{1}{C} \int \operatorname{Im} \operatorname{sen}(wt + \Phi) dt \quad (21)$$

se tiene obtiene que

$$V(t) = V_m \operatorname{sen} wt \quad (22)$$

$$i(t) = \operatorname{Im} \operatorname{sen}(wt + \Phi) \quad (23)$$

Y se tiene que

$$v(t) = R i(t) + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt \quad (24)$$

Sustituyendo 22 y 23 en 24 se tiene:

$$V_m \operatorname{sen} wt = R \operatorname{Im} \operatorname{sen}(wt + \Phi) + L \frac{d}{dt} [\operatorname{Im} \operatorname{sen}(wt + \Phi)] + \frac{1}{C} \int [\operatorname{Im} \operatorname{sen}(wt + \Phi)] dt \quad (25)$$

Desarrollando la derivada y la integral de esta ecuación, y aplicando las identidades trigonométricas resulta:

$$V_m \operatorname{sen} wt = R \operatorname{Im} \operatorname{sen} wt \cos \Phi + R \operatorname{Im} \operatorname{sen} \Phi \cos wt + wL \operatorname{Im} \cos wt \cos \Phi - wL \operatorname{Im} \operatorname{sen} wt \operatorname{sen} \Phi + \frac{\operatorname{Im}}{wC} \operatorname{sen} wt \operatorname{sen} \Phi - \frac{\operatorname{Im}}{wC} \cos wt \cos \Phi \quad (26)$$

Reagrupando términos en el miembro derecho de la ecuación (26) resulta:

$$V \text{m} \text{sen} \omega t = \left[ R \cos \Phi - \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \text{sen} \Phi \right] I \text{m} \text{sen} \omega t + \left[ R \text{sen} \Phi + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \cos \Phi \right] I \text{m} \cos \omega t \quad (27)$$

Igualando términos se tiene:

$$V \text{m} = \left[ R \cos \Phi - \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \text{sen} \Phi \right] I \text{m} \quad (28)$$

$$0 = \left[ R \text{sen} \Phi + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \cos \Phi \right] I \text{m} \cos \omega t \quad (29)$$

De la ec. (29) se tiene que:

$$R \text{sen} \Phi = - \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \cos \Phi \quad (30)$$

$$\frac{\text{sen} \Phi}{\cos \Phi} = \text{tg} \Phi = - \left[ \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \right] \quad (31)$$

Por lo que

$$\Phi = - \text{tg}^{-1} \left[ \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \right] \quad (32)$$

de donde

$$\cos \Phi = R \quad (33)$$

$$\text{sen} \Phi = - \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (34)$$

Sustituyendo la ec. 33 y 34 en la 28 resulta:

$$v_m = \left[ R^2 - \left( \omega L - \frac{1}{\omega c} \right)^2 \right] I_m \quad (35)$$

Así

$$I_m = \frac{V_m}{\left( R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega c} \right)^2 \right)} \quad (36)$$

Por lo que al sustituir la ecuación 32 y 36 en la 23 resulta:

$$i(t) = \left[ \frac{V_m}{\left( R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega c} \right)^2 \right)} \right] \left[ \text{Sen} \omega t - \tan^{-1} \left[ \frac{\omega L - \frac{1}{\omega c}}{R} \right] \right] \quad (37)$$

De acuerdo con la ley de Ohm el termino  $\sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}$

Debe ser la característica del Elemento que hace que este presente una oposición al paso de la corriente eléctrica.

Otro aspecto importante es el relacionado con el ángulo, que representa el defasamiento entre la señal de entrada V(t) y la de salida I(t). Se ve que el valor de éste ángulo puede ser positivo o negativo dependiendo del dominio del efecto inductivo o capacitivo del elemento.

## 1.2 POTENCIA ELECTRICA; ACTIVA Y REACTIVA.

El siguiente concepto importante a establecer es el de potencia. La definición general de potencia en términos de energía es la cantidad de energía consumida o generada por unidad de tiempo. Para el caso particular de la potencia eléctrica, se puede establecer la siguiente definición.

La potencia eléctrica generada o absorbida por un elemento del circuito esta dada por el producto del voltaje entre sus terminales y la corriente que circula a través de él.

Algebraicamente la potencia esta dada por:

$$p = VI = RI^2 = \frac{V^2}{R} \quad (38)$$

Sus unidades en el sistema internacional son los watts o joule/seg.

A) Ahora supóngase que se aplica una señal de corriente alterna a un elemento resistivo, es decir  $v(t) = V_m \text{ sen } \omega t$  como ya se mostró anteriormente la respuesta de este elemento a una señal alterna es  $i(t) = I_m \text{ sen } \omega t$  por lo que la potencia eléctrica consumida será:

$$P(t) = V_m I_m (\text{sen } \omega t) (\text{sen } \omega t) \quad (39)$$

$$P(t) = V_m I_m \text{sen}^2 \omega t = R I_m^2 \text{sen}^2 \omega t = \frac{V_m^2}{R} \text{sen}^2 \omega t \quad (40)$$

De la ecuación anterior se observa que la potencia eléctrica consumida por un elemento resistivo siempre será positiva. La fig. 1.8 muestra gráficamente la variación de la potencia eléctrica consumida por un resistor, cuando se le aplica una señal de corriente alterna

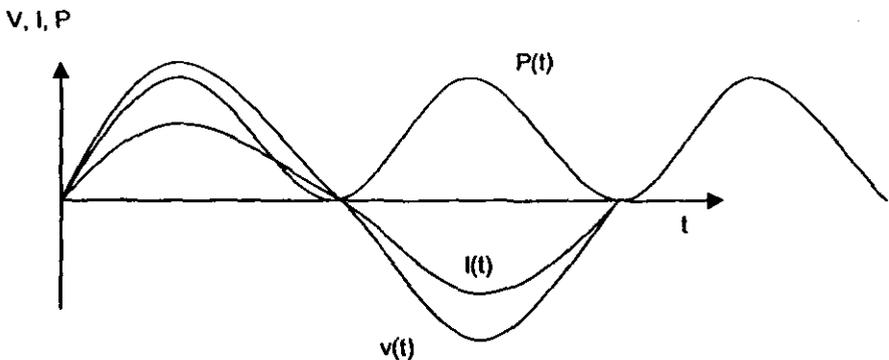


Fig. 1-8. Variación en el tiempo de V, I y P para un elemento resistivo.

De la fig. 1-8 anterior se observa que la potencia eléctrica para un resistor varía con una frecuencia que es el doble de la frecuencia de  $v(t)$  e  $i(t)$ . Esta característica se puede obtener analíticamente si se recuerda que:

$$\text{Sen}\Phi = \left[ \frac{1 - \cos 2\Phi}{2} \right] \quad (41)$$

Por lo que al aplicar la identidad trigonométrica ecuación. (41) en la ecuación (40).

$$P(t) = \frac{V_m I_m (1 - \cos 2\omega t)}{2} \quad (42)$$

B) Para el caso de un elemento capacitivo puro se sabe que la corriente eléctrica, que circula por este elemento ante una señal de voltaje del tipo  $v(t) = V_m \text{sen } \omega t$

Es  $i(t) = I_m \text{Cos}\omega t$  por lo que la potencia eléctrica será:

$$P(t) = V_m I_m (\text{sen } \omega t)(\text{cos } \omega t) \quad (43)$$

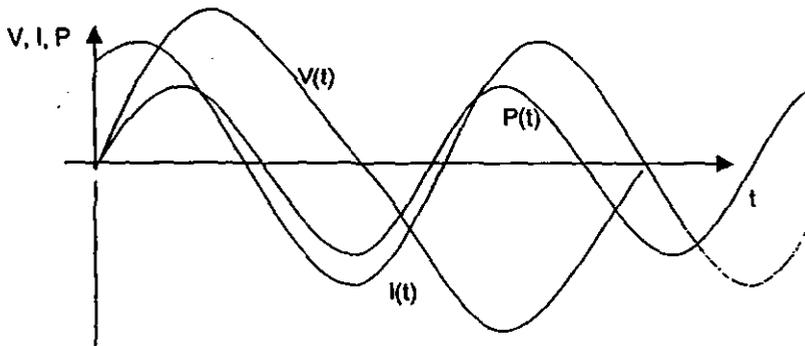
Recordando la identidad trigonométrica.

$$\sin \beta \cos \beta = \frac{\sin 2\beta}{2} \quad (44)$$

Se tiene:

$$P(t) = \frac{V_m I_m \sin 2\omega t}{2} \quad (45)$$

La representación grafica de la potencia consumida por el capacitor se muestra en la siguiente figura..



**Fig. 1-9. Variación en el tiempo de  $v(t)$   $i(t)$  y  $p(t)$  para un elemento capacitivo puro.**

Algunas observaciones importantes son:

- A) La potencia eléctrica consumida varía en el tiempo con una frecuencia igual al doble de la frecuencia de  $v(t)$  e  $i(t)$ .
- B) La potencia eléctrica toma valores + y - con amplitudes máximas iguales.
- C) Los valores máximos + y - de la potencia se suceden cada  $\frac{1}{4}$  de ciclo de la onda de voltaje.

De estas observaciones se puede derivar la siguiente conclusión:

La potencia suministrada a un elemento puramente capacitivo es absorbida por este durante el primer  $\frac{1}{4}$  de la onda de voltaje y devuelta a su fuente suministradora durante el siguiente cuarto de la onda. Se puede decir que la potencia en este elemento tiene un comportamiento reactivo.

Los motores transformadores y en general todos los dispositivos eléctricos que hacen uso del efecto de un campo electromagnético, requieren potencia activa para efectuar un trabajo útil, mientras que la potencia reactiva es utilizada para la generación del campo magnético. Esta potencia reactiva en un elemento capacitivo está defasada  $90^\circ$  de la potencia activa. La potencia reactiva se expresa en volts-ampers reactivos VAR.

C) Para el caso del elemento puramente inductivo, la respuesta  $i(t)$  ante una señal de voltaje

$$v(t) = V_m \text{sen } \omega t \quad \text{es} \quad i(t) = I_m \text{Sen}(\omega t - 90^\circ)$$

Por lo que la potencia eléctrica es:

$$P(t) = V_m I_m (\text{sen } \omega t)(\text{sen } \omega t - 90^\circ) \quad (46)$$

Se tiene:

$$\text{sen}(\omega t - 90^\circ) = -\text{Cos} \omega t \quad (47)$$

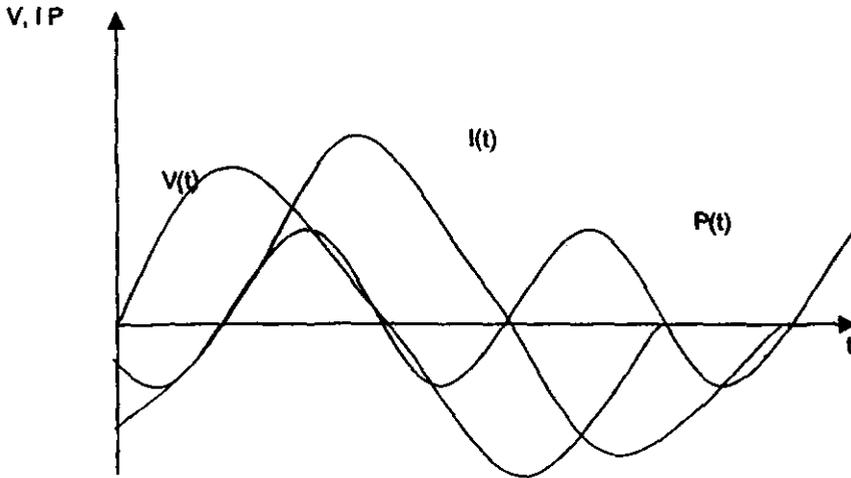
Y

$$\text{Sen} \omega t \text{Cos} \omega t = \frac{\text{Sen} 2 \omega t}{2} \quad (48)$$

Entonces sustituyendo 47 y 48 en 46 se tiene:

$$P(t) = -\frac{V_m I_m \text{sen } 2 \omega t}{2} \quad (49)$$

La representación gráfica de la potencia consumida por este elemento se muestra en la siguiente fig.



**Fig. 1-10. Variación en el tiempo de v, i, y p para un elemento inductivo puro.**

Las mismas observaciones hechas para el caso del elemento capacitivo son válidas para este elemento. Sin embargo existe una diferencia notable que vale la pena resaltar.

El proceso de consumo y suministro de potencia del elemento inductivo es completamente opuesto en el tiempo al proceso del elemento capacitivo. De manera muy simplista pero ilustrativa, se podría pensar que si se conectaran un elemento inductivo y un capacitivo en paralelo y se les aplicara una señal alterna, la potencia estaría siendo intercambiada entre estos elementos de manera continua y alternada.

En conclusión, también la potencia consumida por un elemento inductivo es del tipo reactivo.

D) Resta analizar la forma de la potencia eléctrica consumida por un elemento del tipo general, es decir, uno que tenga R, L y C.

Para este elemento la respuesta  $i(t)$  ante una señal alterna  $v(t) = V_m \text{ sen } \omega t$  es de la forma:

$$i(t) = I_m \text{ sen}(\omega t + \Phi) \quad \text{Donde } \Phi \text{ es el ángulo de fase positivo o negativo.}$$

La potencia de este elemento será:

$$P(t) = V_m I_m (\text{sen } \omega t) \text{ sen}(\omega t + \Phi) \quad (50)$$

Aplicando identidades trigonométricas y manipulando algebraicamente, la ecuación (50) se puede escribir como:

$$P(t) = \frac{V_m I_m \text{ Cos } \Phi}{2} - \frac{V_m I_m \text{ Cos}(2\omega t + \Phi)}{2} \quad (51)$$

o

$$P(t) = V_m I_m \text{ Cos } \Phi (1 - \text{Cos } 2\omega t) + \frac{V_m I_m \text{ Sen } \Phi \text{ Sen } 2\omega t}{2} \quad (52)$$

En este instante resulta conveniente recordar y aplicar un concepto que se define como el valor cuadrático medio del voltaje o valor rms del voltaje. Este valor se establece como:

$$V_{rms} = \frac{V_{maximo}}{\sqrt{2}} = V \quad (53)$$

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = I \quad (54)$$

Aplicando las ecuaciones (53) y (54) en las ecuaciones (51) y (52) se tiene:

$$P(t) = VI \text{ Cos } \Phi - VI \text{ Cos}(2\omega t + \Phi) \quad (55)$$

$$P(t) = VI \text{ cos } \Phi (1 - \text{cos } 2\omega t) + VI \text{ sen } \Phi \text{ sen } 2 \omega t \quad (56)$$

Si se observa en las ecuaciones 55 y 56 existen algunos factores que no varían con el tiempo como son  $VI \cos(\Phi)$  y  $VI \sin(\Phi)$ . De estos valores se encuentra la potencia real o activa y tenemos que:

$$P(t) = P - VI \cos(2\omega t + \Phi) \quad (57)$$

$$P(t) = P(1 - \cos 2\omega t) + Q \sin 2\omega t \quad (58)$$

De las ecuaciones anteriores se puede ver que la potencia eléctrica consta de dos componentes fundamentales, uno dado por el término  $P(1 - \cos 2\omega t)$  que es la potencia instantánea, cuyas características que nunca toma valores negativos, y el otro lado por el término  $Q \sin 2\omega t$  cuya característica es la de tener un valor promedio igual a cero. Los dos términos arriba descritos pulsán a una frecuencia angular igual a  $2\omega$ , pero el primero de ellos lo hace alrededor de un valor promedio positivo dado por  $P$  que es la potencia activa o real mientras que el segundo lo hace con un valor promedio igual a cero y un valor máximo igual a  $Q$ .

$$P = VI \cos \Phi \quad \text{watts o joule/seg.} \quad (59)$$

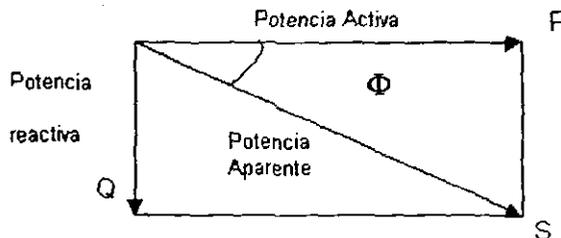
$$Q = VI \sin \Phi \quad \text{volt-ampere reactivos (VAR)} \quad (60)$$

En donde  $P$  es la potencia activa o real dada en watts.

$Q$  es la potencia reactiva dada en volts-ampers reactivos VAR.

Aquí surge otro concepto el de potencia aparente que es el producto de la corriente y el voltaje, es también la resultante de la suma de los vectores gráficos de la potencia activa y la potencia reactiva esta dada en volt-ampers VA.

La siguiente representación gráfica puede ser útil para ilustrar las diferentes formas de potencia eléctrica.



### 1.3 DEFINICION DEL TERMINO FACTOR DE POTENCIA

Las cargas inductivas tales como motores de inducción, hornos de inducción, plantas de soldar, lámparas fluorescentes etc. Requieren dos clases de corriente, corriente de magnetización y corriente productora de potencia. La corriente de magnetización, conocida como reactiva, proporciona el flujo para los campos magnéticos de los dispositivos de inducción. Sin corriente de magnetización la energía eléctrica no puede fluir a través del núcleo de los transformadores o en el entrehierro de los motores de inducción.

Los transformadores y motores de inducción se magnetizan con la componente de retraso de la corriente de C.A de línea. La energía utilizada en formar el campo magnético fluye hacia atrás y hacia delante entre el generador y la carga. Esta corriente de magnetización es la causa real de un factor de potencia bajo en el sistema.

Sobre la base de las anteriores corrientes, se puede definir el factor de potencia como la relación que existe entre la corriente productiva en un circuito y la corriente total de dicho circuito

Otra definición el factor de potencia es el defasamiento entre la corriente y el voltaje de alimentación en un sistema eléctrico provocado por una carga reactiva, el cual es mayor o menor dependiendo de la carga que se encuentre en operación.

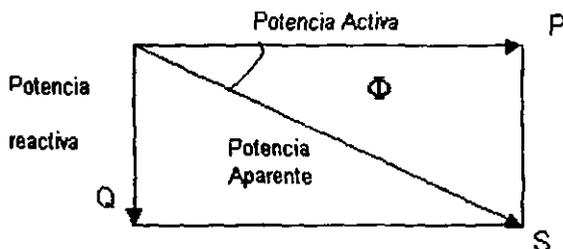
El factor de potencia conocido también como *coseno del ángulo  $\Phi$* , se define también como la relación existente entre la potencia real consumida *P* en watts y la potencia aparente *S* en volts-ampers VA. Esto es:

$$\text{Potencia real o activa} = P = VI \cos \Phi \text{ [watts]}$$

$$\text{Potencia reactiva} = Q = VI \text{ Sen } \Phi \quad \text{[ VAR]}$$

$$\text{Potencia aparente} = S = VI \quad \text{[VA]}$$

Gráficamente :



De este triángulo se observa lo siguiente:

El ángulo entre las potencias activa y aparente es denotado por la letra  $\Phi$  tenemos que:

$$\text{Potencia activa} = \text{Potencia aparente} \times \text{Cos } \Phi .$$

$$P = S \text{ Cos } \Phi \quad (61)$$

El valor del  $\text{Cos } \phi$  es llamado factor de potencia. El factor de potencia puede ser expresado como una función de las potencias activa y reactiva. De lo cual:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (62)$$

$$\text{Cos } \Phi = F.P. = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{P}{S} \quad (63)$$

Además de  $\text{Cos } \Phi$  la tangente del ángulo  $\Phi$  es también usada para encontrar el factor de potencia

$$\text{Tan}\Phi = \frac{Q}{S} \quad (64)$$

El factor de potencia da la idea de que cantidad de potencia es utilizada por cargas activas y reactivas, el tener un bajo factor de potencia en una instalación industrial implica un consumo alto de corrientes reactivas, un riesgo de incurrir en pérdidas excesivas y sobrecargas en los equipos eléctricos, redes de distribución así como en las líneas de transmisión.

El sistema de suministro publico tiene que alimentar la potencia activa y también la potencia reactiva que necesitan las cargas inductivas. Esto impone una carga adicional a la capacidad del sistema de suministro.

El gasto por pérdidas en el sistema debido al flujo de corrientes reactivas es un factor económico importante que no debe menospreciarse ya que si los kilovars que necesitan estas cargas no se suministran por otros medios, el flujo de corriente reactiva en el sistema consume las capacidades térmicas y de voltaje de línea y del equipo.

Una planta industrial que opera con un factor de potencia bajo puede:

- Reducir la capacidad del sistema y su rendimiento debido a cables y transformadores sobrecargados.
- Aumentar las perdidas debido a la resistencia de los conductores.
- Reducir el nivel de voltaje, afectando en forma adversa la eficiencia de operación de los motores.
- Reducir la iluminación de las lamparas incandescentes.
- Aumentar el costo de la energía, cuando la compañía de suministro publico impone las condiciones del factor de potencia.

Desde él, punto de vista económico, esto puede traducirse en la necesidad de cables de energía de mayor calibre y por consiguiente el costo de estos es mas elevado e incluso en la necesidad de invertir en nuevos equipos de generación y transformación,

esto es si la potencia demandada llega a sobrepasar la capacidad de los equipos ya existentes.

Las compañías de suministro, generalmente compensan las pérdidas en sus ingresos, causadas por un factor de potencia bajo, en la planta del usuario haciendo un cargo adicional a la tarifa normal. El mejoramiento del factor de potencia conduce a importantes ahorros en el costo de la energía y mejora la eficiencia de la planta.

En México la compañía suministradora (compañía de Luz y Fuerza y Comisión Federal de Electricidad) se ha preocupado por sus plantas generadoras, así como de alimentar la carga demandada, por lo que establecen en el diario oficial de la federación, con fecha del 10 de noviembre de 1991 lo siguiente:

El usuario procurara mantener un factor de potencia tan aproximado al 100% como le sea posible, pero en caso de que su factor de potencia durante cualquier periodo de facturación tenga un promedio menor de 90% atrasado determinado por métodos aprobados por la secretaria de comercio y fomento industrial, el suministrador tendrá derecho a cobrar al usuario la cantidad que resulte de aplicar al monto de la facturación el porcentaje de recargo que se determine según la fórmula que se señala.

En el caso de que el factor de potencia tenga un valor igual o superior de 90% el suministrador tendrá la obligación de bonificar al usuario la cantidad que resulte de aplicar a la factura el porcentaje de bonificación según la fórmula que también se señala.

**Formula de recargo:**

$$\text{Porcentaje de recargo} = \frac{3}{5} ((90/F.P) - 1) \times 100 \text{ ----- } F.P. < 90\%$$

$$\text{Porcentaje de bonificación} = \frac{1}{4} \times (1 - (90/F.P.)) \times 100 \text{ ----- } F.P. > 90\%$$

Donde: F.P. = factor de potencia expresado en por ciento.

## 1.4 CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA.

Con el propósito de realizar la compensación de la potencia reactiva en los sistemas eléctricos se emplean tres métodos, los cuales se enumeran y describen a continuación.

- a) Utilización de motores sincronicos.
- b) Utilización de capacitores sincronicos.
- c) Utilización de bancos de capacitores.

Los motores sincronicos son capaces de proporcionar trabajo mecánico y al mismo tiempo actuar como una carga capacitiva, en caso de operar sobreexcitados. Aunque se puede considerar como una ayuda que mejora el factor de potencia, no constituye una forma de compensación controlable con facilidad.

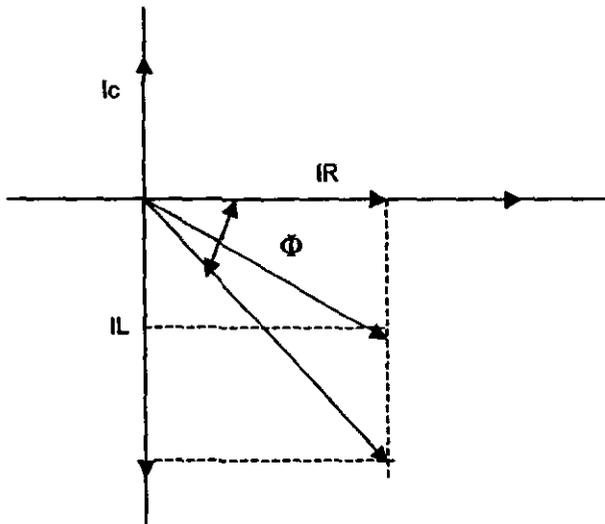
Los capacitores sincronicos son motores diseñados para controlar el factor de potencia, suelen ser de gran tamaño y capaces de proporcionar una cantidad elevada de potencia reactiva, tanto de carácter capacitivo como inductivo, según sea necesario; también mejoran la estabilidad de las líneas de transmisión en los regimenes transitorios. Sin embargo son equipos cuyo uso implica una fuerte inversión y un mantenimiento bastante costoso.

Los bancos de capacitores dan la potencia reactiva de carácter capacitivo que sea necesaria, pudiéndose instalar bancos fijos y bancos desconectables.

El uso de los capacitores de potencia, comparado con el de otros medios de generación de potencia reactiva, implica las interesantes ventajas de un bajo costo por KVAR instalado, un fácil manejo y un mantenimiento tan sencillo y barato que, en muchos casos, se vuelve prácticamente inexistente. Este es el motivo de la aceptación universal que han tenido los capacitores de potencia en todos los sistemas de distribución o consumo de energía, y su demanda es notablemente creciente año tras año.

Al instalar un banco de capacitores en un circuito de corriente alterna compuesto por elementos resistivos e inductivos, se tiene un circuito RLC, en el cual se ve disminuida la

corriente reactiva inductiva  $I_L$  por la corriente reactiva capacitiva del banco de capacitores, la cual esta adelantada  $90^\circ$  del vector tensión. Esto origina que el valor del ángulo  $\Phi$  disminuya, reduciéndose el valor de la corriente del circuito  $I_A$ . El efecto de la corriente capacitiva sobre la inductiva se muestra gráficamente en la fig. 1-11.



**Fig. 1-11. Efecto de una corriente capacitiva sobre una corriente inductiva.**

El método más simple y económico para corregir el factor de potencia en las plantas industriales, que no requieren de motores adicionales de mayor capacidad es mediante el uso de capacitores. Cuando los capacitores se aplican adecuadamente a un sistema, suministran la corriente reactiva de magnetización y eliminan la corriente reactiva del circuito de la planta, mejorando así el factor de potencia global. Los capacitores también mejoran la eficiencia de una planta industrial liberando la capacidad eléctrica del sistema (KVA) elevando el nivel de voltaje y reduciendo las pérdidas.

La compensación del factor de potencia se logra al pasar de un factor de potencia  $FP_1$  a un factor de potencia  $FP_2$  reduciendo el ángulo  $\Phi$  tanto como se desee, al instalar capacitores. Para esto es necesario conocer el valor de KVAR del capacitor que reduzca el efecto inductivo de la carga. Este valor puede ser obtenido matemáticamente o gráficamente.

A continuación se verá como calcular los KVAR del capacitor necesarios para corregir el factor de potencia.

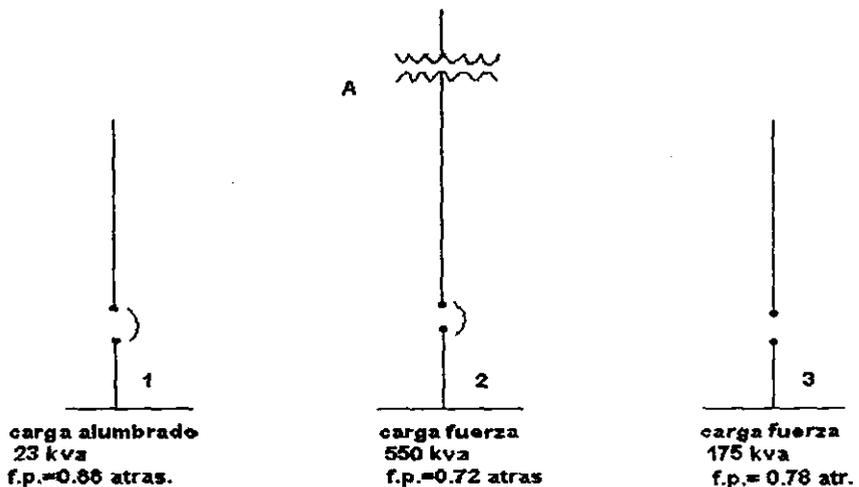
Generalmente los factores de potencia de cargas individuales se pueden estimar con precisión y son conocidos.

Los factores de potencia de las cargas individuales se pueden combinar para calcular el factor de potencia de un grupo de cargas diferentes. El método consiste en sumar aritméticamente los kw y sumar algebraicamente los KVAR. Las dos componentes se combinan entonces vectorialmente. El factor de potencia para un grupo de cargas, cada una con un factor de potencia diferente, también se puede obtener por un método gráfico

El método matemático para calcular el factor de potencia total de la subestación usa el total de KW y KVAR de los tres tipos diferentes de cargas como sigue:

Ejemplo: en la disposición mostrada a continuación determinar:

- a) el factor de potencia existente en la instalación en el punto A.
- b) Los KVAR necesarios para mejorar el factor de potencia en los puntos A, 1, 2 y 3 a un valor de 0.98 atrasado.



**SOLUCION:**

a) En el punto 1 tenemos.

$$P = S \cos \Phi = (23)(0.88) = 20.24KW$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(23)^2 - (20.24)^2} = 10.92 \text{ KVAR}$$

Para el punto dos.

$$P = S \cos \Phi = (550)(0.72) = 396 \text{ KW}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(550)^2 - (396)^2} = 381.68 \text{ KVAR.}$$

Para el punto tres.

$$P = S \cos \Phi = (175)(0.78) = 136.5 \text{ KW}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(175)^2 - (136)^2} = 109.51 \text{ KVAR.}$$

Realizando la sumatoria de potencias para determinar el factor de potencia existente en el punto A.

$$P = 20.24kw + 396kw + 136.5kw = 552.74 \text{ Kw.}$$

$$Q = 10.92k \text{ var} + 381.68k \text{ var} + 109.51k \text{ var} = 502.11 \text{ KVAR}$$

Entonces el factor de potencia en el punto A será:

$$F.P. = \frac{P}{S} = \left[ \frac{552.74}{746.75} \right] = 0.74$$

b) Encontraremos entonces la potencia reactiva capacitiva (PRCn) necesaria, en el punto A para corregir el factor de potencia a un valor de 0.98 atrasado, utilizando la siguiente ecuación:

$$PRCn = P(\tan\Phi_1 - \tan\Phi_2)$$

$$P = 552.74 \text{ Kw.} \quad \text{F.P.} = 0.74$$

$$\Phi_1 = \text{Arc. Cos } 0.74 = 42.26^\circ$$

$$\Phi_2 = \text{Arc. Cos } 0.98 = 11.47^\circ$$

$$PRCn = 552.74 \text{ Kw} (\tan 42.26^\circ - \tan 11.47^\circ) = 390.09 \text{ KVARc}$$

De la misma forma se procede para encontrar la potencia reactiva capacitiva necesaria en los puntos 1, 2 y 3 para corregir el factor de potencia a un valor de 0.98 atrasado.

♦ Para el punto 1.

$$P = 20.24 \text{ KW} \quad \text{Cos } \Phi = 0.88$$

$$\Phi_1 = \text{Arc. Cos } 0.88 = 28.35^\circ$$

$$\Phi_2 = \text{Arc. Cos } 0.98 = 11.47^\circ$$

$$PRCn = 20.24 \text{ kw} (\tan 28.35^\circ - \tan 11.47^\circ) = 6.81 \text{ KVARc.}$$

♦ Para el punto 2.

$$P = 396 \text{ KW} \quad \text{Cos } \Phi = 0.72$$

$$\Phi_1 = \text{Arc. Cos } 0.72 = 43.94^\circ$$

$$\Phi_2 = \text{Arc. Cos } 0.98 = 11.47^\circ$$

$$PRCn = 396kw(\text{Tan}43.94^\circ - \text{Tan}11.47^\circ) = 301.26 \text{ KVARc}$$

♦ Para el punto 3.

$$P=136.5 \text{ KW} \quad \text{Cos } \Phi = 0.78$$

$$\Phi_1 = \text{Arc. Cos } 0.78 = 38,73^\circ$$

$$\Phi_2 = \text{Arc. Cos } 0.98 = 11.47^\circ$$

$$PRCn = 136.5kw(\text{Tan}38.73^\circ - \text{Tan}11,47^\circ) = 81.77 \text{ KVARc.}$$

**Ejemplos:**

En el circuito derivado de un motor monofasico, que opera a 127 volts, 60 hz; se conectan un waltmetro y un varmetro. Que leen respectivamente 1860 watts y 890 VAR, calcular:

- a) Las componentes de corriente activa y reactiva.
- b) La corriente de línea.
- c) La potencia aparente suministrada, por el circuito derivado.
- d) El factor de potencia a que opera el motor.

Solución:

- a) La componente de la corriente activa.

$$I_A = \frac{P}{V} = \frac{1860W}{127V} = 14.65 \text{ Amp.}$$

La componente de corriente reactiva.

$$I_R = \frac{Q}{V} = \frac{890}{127} = 7A$$

La corriente de línea o alimentación, se calcula como:

$$I_L = \sqrt{I_A^2 + I_R^2} = \sqrt{(14.65)^2 + (7)^2} = 16.23 \text{ Amp.}$$

La potencia aparente suministrada por el circuito derivado.

$$S = VI = (127V)(16.23A) = 2061.21V.A.$$

También se puede calcular como:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(1860)^2 + (890)^2} = 2061VA$$

b) El factor de potencia.

$$\text{COS}\Phi = \frac{P}{S} = \frac{1860W}{2061.8VA} = 0.902$$

**Ejemplo** . un motor trifasico de inducción, conectado en estrella con una potencia de 5000 HP se conecta a un alimentador a 4160 volts entre fases, 60 hz. Al alimentador se conecta también, un banco de capacitores de 1800 KVAR. Si el motor entrega una potencia de 3600 HP, con una eficiencia del 94 %; y un factor de potencia atrasado de 0.90, calcular:

- a) La potencia activa que demanda el motor.
- b) La potencia reactiva que demanda el motor.
- c) La potencia reactiva suministrada por el alimentador.

d) La potencia aparente suministrada por el alimentador.

Solución:

a) La potencia activa que demanda el motor.

La potencia que entrega el motor de 3600 HP, es equivalente a:

$$P_1 = (3600HP) \left( \frac{0.746KW}{1HP} \right) = 2685.6 \text{ Kw.}$$

La potencia activa de entrada al motor, es entonces:

$$P_2 = \frac{P_1}{\text{Eficiencia}} = \frac{2685.6}{0.94} = 2857 \text{ KW}$$

b) la potencia aparente que demanda el motor

$$S_m = \frac{P_1}{\text{Cos}\Phi} = \frac{2857}{0.9} = 3174.4 \text{ kva}$$

La potencia reactiva que absorbe el motor, es entonces:

$$Q_m = \sqrt{S_m^2 - P_2^2} = \sqrt{(3174.4)^2 - (2857)^2} = 1383.6 \text{ KVAR}$$

c) La potencia reactiva suministrada por el alimentador.

La que suministra el banco de capacitores es:

$$Q_c = 1800 \text{ KVAR}$$

La potencia reactiva que se regresa al alimentador, es:

$$Q_L = Q_c - Q_m = 1800 - 1383.6 = 416.4 \text{ KVAR}$$

d) La potencia aparente entregada por la línea.

$$S_L = \sqrt{P_1^2 + Q_L^2} = \sqrt{(2857)^2 + (416.4)^2} = 2887 \text{ kva}$$

### El método gráfico.

El método más sencillo es mediante el uso de tablas que incluyen un factor multiplicador de KW. Las tablas son convenientes para determinar los KVAR necesarios en un capacitor o un motor sincrónico para lograr la corrección deseada del factor de potencia.

Por ejemplo si se tiene un circuito con una carga total de 34 000 KW y un factor de potencia original de 0.76 y se desea corregir este factor a 0.95. de la tabla 2 se determina este factor multiplicador da 0.526.

Este factor se determina localizando 0.76 bajo factor de potencia original, después se lee hacia la derecha hasta localizar 0.95 bajo factor de potencia deseado. En la intersección de la línea y la columna se encuentra el número buscado.

Para los fines prácticos del cálculo, los procedimientos se simplifican aun más, ya que se hace uso de tablas o de nomogramas, en donde se lee directamente la potencia requerida por el condensador o banco de condensadores; en función del factor de potencia actual y del factor de potencia deseado.

Dadas las características globales de una instalación: la potencia activa y la potencia reactiva, el grado de compensación de la energía reactiva, es el resultado de conveniencia económica. Por otra parte, siempre es conveniente reportar el factor de potencia, con un valor superior al mínimo establecido en el contrato, con la compañía suministradora; ya que la solución adoptada deberá ser objeto de una comparación entre el costo adicional a la instalación y el beneficio que se obtiene.

En la fig. 1-12 se tiene un nomograma de la relación entre potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia. Conocidas dos de las tres cantidades se calcula la tercera. Por ejemplo. Se muestra que con una potencia activa de 70 kw y un factor de potencia de 0.8 la potencia reactiva es de 53 KVAR; este nomograma permite el cálculo directo de estas relaciones.

También se hace uso de otro nomograma que relaciona el factor de potencia de la instalación, y el factor de potencia que se desea obtener; con un coeficiente K, mediante el cual se calcula la potencia reactiva como:  $Q = K P$  siendo P la potencia activa de la instalación y Q la potencia reactiva necesaria del banco de capacitores.

Por ejemplo, en una instalación eléctrica con una potencia de 1000 kw con un factor de potencia de 0.6; si se desea mejorar el factor de potencia a 0.9, del nomograma de la fig. 13, el coeficiente K, es 0.8; por lo tanto la potencia necesaria de los condensadores es:

$$Q = K P = (0.8)(1000) = 800 \text{ KVAR.}$$

P.F. ORIGINAL	FACTOR DE POTENCIA DESEADO											
	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
0.98	0.754	0.782	0.810	0.840	0.871	0.903	0.937	0.974	1.015	1.063	1.123	1.266
0.96	0.721	0.749	0.777	0.807	0.838	0.870	0.904	0.941	0.982	1.030	1.090	1.233
0.94	0.689	0.717	0.745	0.775	0.806	0.838	0.872	0.909	0.950	0.998	1.068	1.201
0.95	0.657	0.685	0.713	0.743	0.774	0.806	0.840	0.877	0.918	0.966	1.026	1.169
0.96	0.626	0.654	0.682	0.712	0.743	0.775	0.809	0.846	0.887	0.935	0.995	1.138
0.97	0.596	0.624	0.652	0.682	0.713	0.745	0.779	0.816	0.857	0.905	0.965	1.108
0.98	0.566	0.594	0.622	0.652	0.683	0.715	0.749	0.786	0.827	0.875	0.935	1.078
0.99	0.537	0.565	0.593	0.623	0.654	0.686	0.720	0.757	0.798	0.846	0.906	1.049
0.99	0.508	0.536	0.564	0.594	0.625	0.657	0.691	0.728	0.769	0.817	0.877	1.020
0.99	0.480	0.508	0.536	0.566	0.597	0.629	0.663	0.700	0.741	0.789	0.849	0.992
0.99	0.452	0.480	0.508	0.538	0.569	0.601	0.635	0.672	0.713	0.761	0.821	0.964
0.99	0.424	0.452	0.480	0.510	0.541	0.573	0.607	0.644	0.685	0.733	0.793	0.936
0.99	0.397	0.425	0.453	0.483	0.514	0.546	0.580	0.617	0.658	0.706	0.766	0.909
0.99	0.370	0.398	0.426	0.456	0.487	0.519	0.553	0.590	0.631	0.679	0.739	0.882
0.99	0.343	0.371	0.399	0.429	0.460	0.492	0.526	0.563	0.604	0.652	0.712	0.855
0.99	0.317	0.345	0.373	0.403	0.434	0.466	0.500	0.537	0.578	0.622	0.685	0.829
0.99	0.290	0.318	0.346	0.376	0.407	0.439	0.473	0.510	0.551	0.599	0.659	0.802
0.99	0.264	0.292	0.320	0.350	0.381	0.413	0.447	0.484	0.525	0.573	0.633	0.776
0.99	0.238	0.266	0.294	0.324	0.355	0.387	0.421	0.458	0.499	0.547	0.609	0.750
0.99	0.212	0.240	0.268	0.298	0.329	0.361	0.395	0.432	0.473	0.521	0.581	0.724
0.99	0.186	0.214	0.242	0.272	0.303	0.335	0.369	0.406	0.447	0.495	0.555	0.698
0.99	0.160	0.188	0.216	0.246	0.277	0.309	0.343	0.380	0.421	0.469	0.529	0.672
0.99	0.134	0.162	0.190	0.220	0.251	0.283	0.317	0.354	0.395	0.443	0.503	0.646
0.99	0.108	0.136	0.164	0.194	0.225	0.257	0.291	0.328	0.369	0.417	0.477	0.620
0.99	0.081	0.109	0.137	0.167	0.198	0.230	0.264	0.301	0.342	0.390	0.450	0.593
0.99	0.055	0.083	0.111	0.141	0.172	0.204	0.238	0.275	0.316	0.364	0.424	0.567
0.99	0.028	0.056	0.084	0.114	0.145	0.177	0.211	0.248	0.289	0.337	0.397	0.540
0.99	0.000	0.028	0.056	0.086	0.117	0.149	0.183	0.220	0.261	0.309	0.369	0.512
0.99		0.000	0.028	0.058	0.089	0.121	0.155	0.192	0.233	0.281	0.341	0.484
0.99			0.000	0.030	0.061	0.093	0.127	0.164	0.205	0.253	0.313	0.456
0.99				0.000	0.031	0.063	0.097	0.134	0.175	0.223	0.283	0.426
0.99					0.000	0.032	0.066	0.103	0.144	0.192	0.252	0.395
0.99						0.000	0.034	0.071	0.112	0.160	0.220	0.363
0.99							0.000	0.037	0.079	0.126	0.186	0.329
0.99								0.000	0.041	0.089	0.149	0.292
0.99									0.000	0.048	0.108	0.251
0.99										0.000	0.060	0.203
0.99											0.000	0.143

Tabla 1-1. Factores multiplicadores para determinar los KVAR

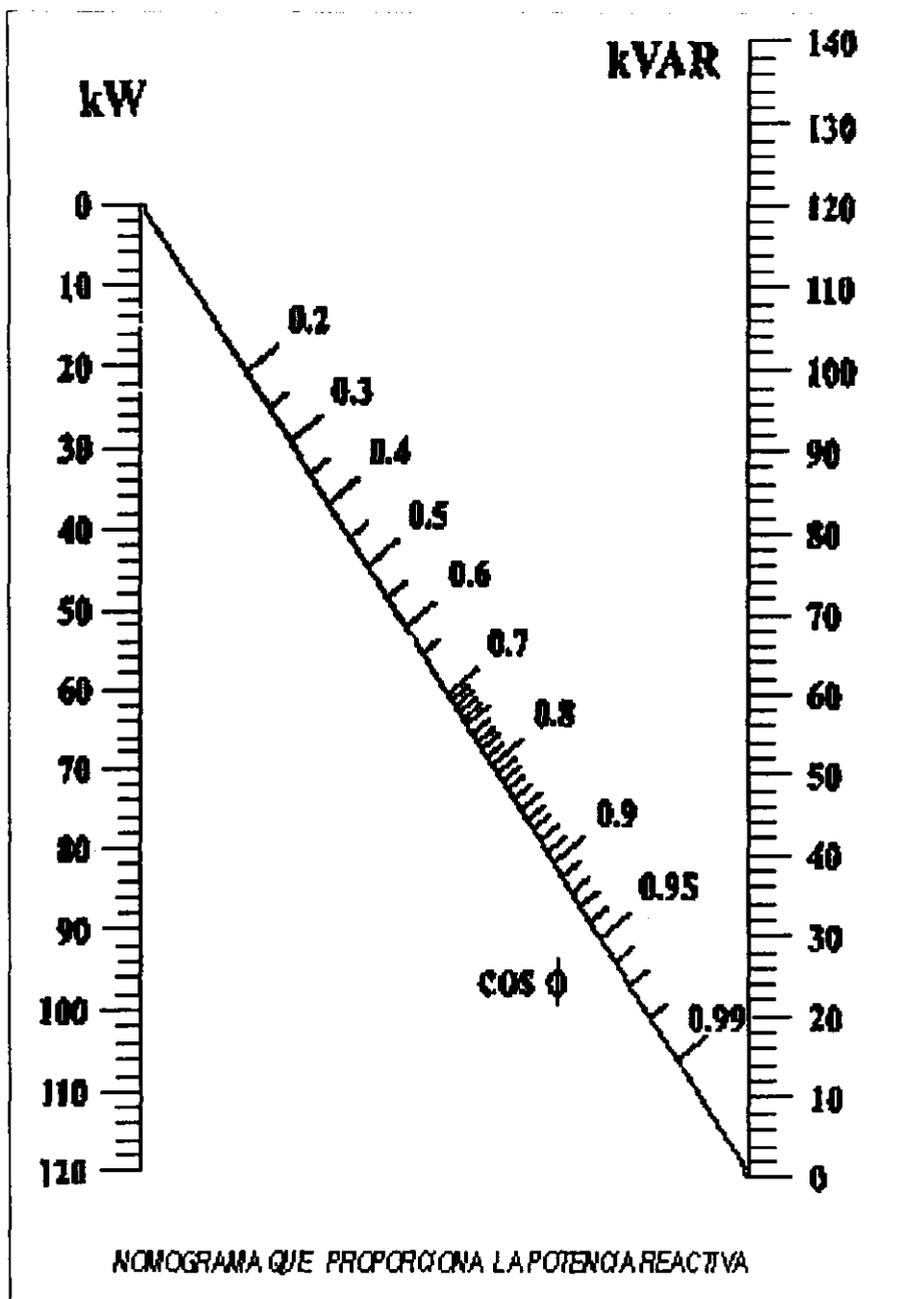
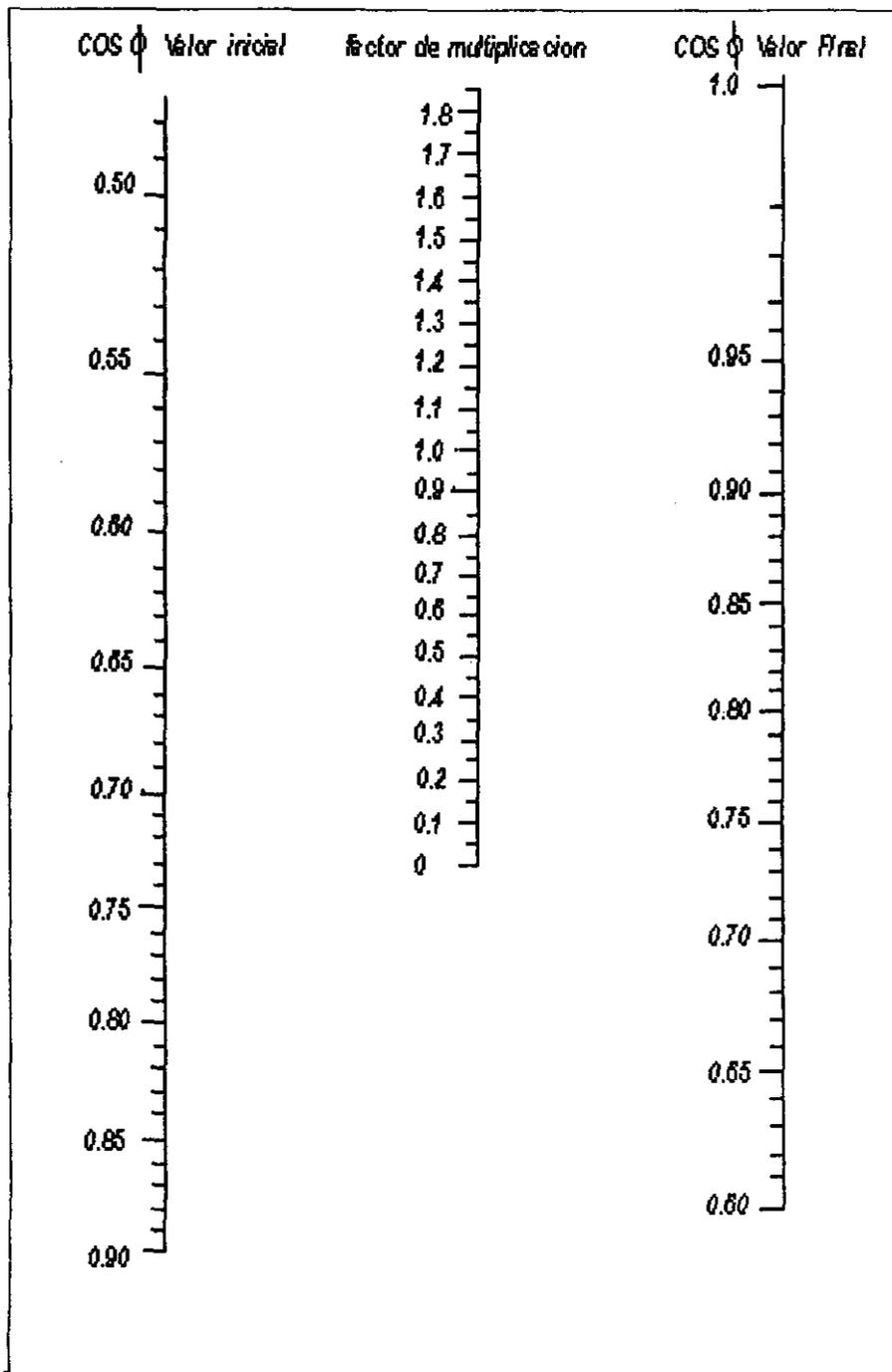


Fig. 1-12

Fig. 1-13. Nomograma para la corrección del F.P.



### 1.5 METODOS DE MEDICION DEL FACTOR DE POTENCIA.

Para determinar las necesidades de capacitores, se debe de conocer el factor de potencia de la carga; lo cual se logra con la ayuda de un equipo de medición adecuado. Cuando se escoge el equipo de medición debe tenerse cuidado, ya que es difícil seleccionarlo sin información conveniente. A continuación se enumeran cuatro métodos, los cuales proporcionan la información necesaria a fin de calcular el factor de potencia:

1. Wattmetro, amperímetro y voltímetro.
2. Wathorímetro, amperímetro y voltímetro.
3. Wathorímetro y varhorímetro.
4. Medidor del factor de potencia.

El tipo de instrumentación seleccionada se debe relacionar con el método que se emplee. El método del wattmetro, amperímetro y voltímetro se basa en que el factor de potencia de un circuito de corriente alterna se da por la relación de los kilowatts (potencia activa) y los volts-ampers (potencia aparente).

Los kilowatts se encuentran haciendo la lectura instantánea del wattmetro, los volts-ampers se obtienen haciendo la multiplicación de los volts por los ampers de acuerdo con las lecturas instantáneas. La fórmula para obtener los KVA, es la siguiente:

$$KVA = \frac{1.732(V)(I)}{1000} \quad (65)$$

En esta ecuación entra la constante 1.732 por tratarse de un circuito trifásico, en donde el voltaje entre líneas es de 1.732 veces mayor que el voltaje entre fases, dividiendo entre 1000 para obtener kilovolts-ampers.

Para obtener el valor correspondiente al factor de potencia, se sustituyen los valores de las mediciones efectuadas en el circuito en las siguientes fórmulas:

$$F.P. = \frac{P}{\sqrt{3}(V)(I)} \quad (66)$$

$$F.P. = \frac{P}{VI} \quad (67)$$

La primera de ellas sirve en el caso de circuitos trifasicos y la segunda, si se trata de circuitos monofasicos.

A continuación se muestran los diagramas de conexiones para la medición de potencia tanto en un circuito monofasico como en uno trifasico

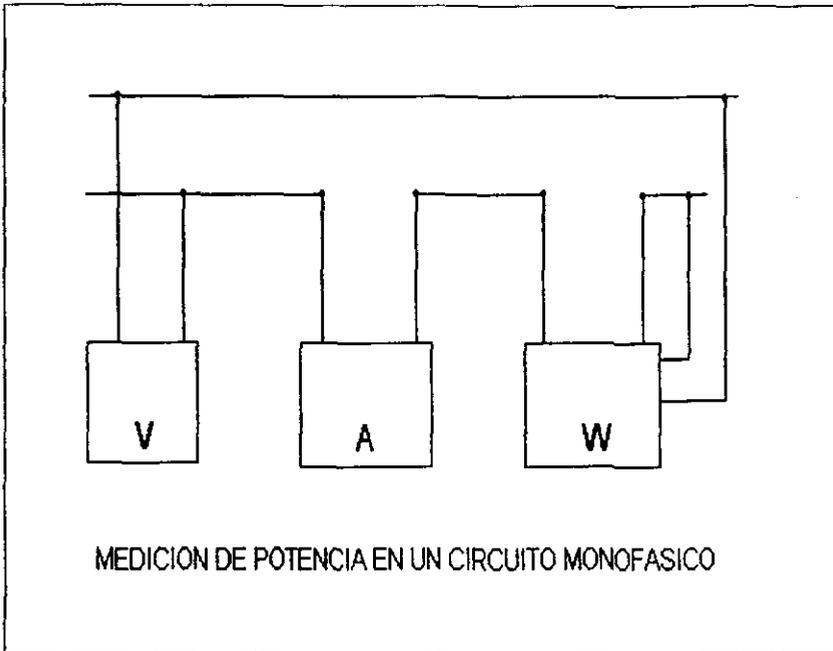


Fig. 1-14

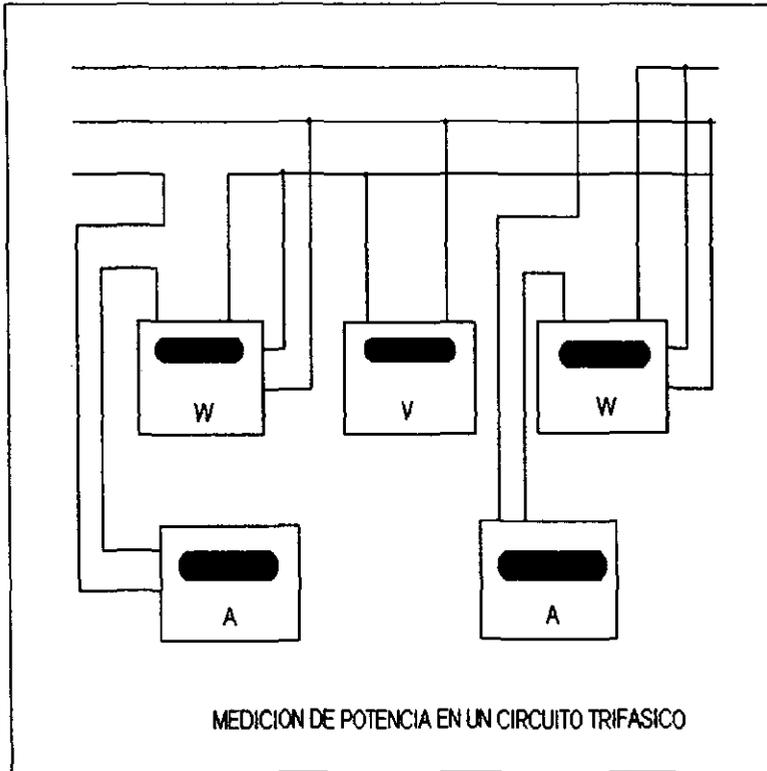


Fig. 1-15.

Este método (wattmetro, amperímetro y voltímetro) se puede emplear tanto en alta como en baja tensión; naturalmente que al trabajar con alta tensión, se tomarán las precauciones necesarias.

Con el segundo método (wathorímetro, voltímetro y amperímetro) la potencia real o activa ( $p$ ) en watts se puede calcular con la siguiente ecuación.

$$P = \frac{(3600)(REV.)(Kh)}{TIEMPO(seg.)} \quad (68)$$

Esto se logra contando las revoluciones R del disco del wathorímetro durante un periodo de tiempo especificando y conociendo la constante del medidor (kh); Posteriormente, con el promedio de las lecturas del amperímetro y volmetro en este mismo periodo de tiempo, se calcula el factor de potencia con las ecuaciones vistas en el método anterior.

Utilizando el tercer método mencionado (wathorímetro y varhorímetro) las lecturas diarias, semanales, o mensuales de estos instrumentos dan el factor de potencia, en el periodo seleccionado por medio de la siguiente ecuación.

$$F.P. = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

Por último, el método del medidor de factor de potencia es el más sencillo, ya que las lecturas en el instrumento dan directamente los valores requeridos del factor de potencia; el único inconveniente de este método es que está limitado para circuitos con cargas balanceadas.

En plantas industriales con muchas subestaciones puede no ser económico equipar a cada una con los instrumentos de medición mencionados sólo para verificar el factor de potencia en ciertos intervalos. Sin embargo, se puede instalar un panel con terminales de prueba en cada una de ellas, con el propósito de conectar los instrumentos que miden los parámetros eléctricos.

## CAPITULO DOS

### 2.1 BENEFICIOS AL CORREGIR EL BAJO FACTOR DE POTENCIA.

El bajo factor de potencia –menor al 90%- lo penaliza la compañía suministradora, con una multa sobre la base de un porcentaje sobre la facturación total del consumo de energía eléctrica. Así mismo la compañía suministradora proporciona una bonificación cuando se tiene un factor de potencia mayor del 90%

Por lo que dada la política del gobierno para fomentar el ahorro de energía eléctrica y tomando en cuenta que el costo de este insumo es cada vez mas alto, es importante considerar las posibilidades de ahorro de energía eléctrica en el sistema.

En consecuencia con toda mejoría del factor de potencia, disminuyen los KW y los KVA de capacidad. A mayor factor de potencia, se necesitan menos KVA para una carga dada. Un factor de potencia alto significa menos KVA en los generadores y transformadores instalados, así como alimentadores de circuitos principales y secundarios de menor capacidad.

Con una mejoría del factor de potencia de 70 a 90 por ciento, se reduce la corriente en el circuito en un 28 por ciento para la misma carga de KW.

Cada año se gastan inútilmente miles de pesos en las plantas industriales por desconocer los beneficios que se obtienen mejorando el factor de potencia. Se incurre en este gasto debido a la inversión innecesaria de capital en equipo destinado a aumentar los KVA de capacidad, y al cargo que hacen las compañías de suministro por bajo factor de potencia.

Adicionalmente a la eliminación de la multa, el elevar el factor de potencia en una instalación eléctrica redundará en beneficios de varios tipos como:

- Reducción de pérdidas en conductores eléctricos.
- Reducción de pérdidas en transformadores.

- Mejor regulación de voltaje en transformadores.
- Menor caída de voltaje en los conductores.
- Liberación de potencia aparente en el transformador.
- Mejor regulación de voltaje en el sistema.
- Alivio de la capacidad del sistema existente.

### **Diagrama de corriente.**

Una carga que consuma la mayor potencia reactiva y el factor de potencia más bajo es el fenómeno eléctrico que puede suceder en condiciones estables.

Para una potencia consumida constante, el factor de potencia más bajo, la potencia aparente será más alta y así también más alta la cantidad de corriente de la red. Con un factor de potencia igual a 0.5, la cantidad de corriente por la carga será dos veces la corriente útil.

Con un factor de potencia igual a 0.9 la cantidad de corriente será 10% más alta que la corriente útil. Para una potencia constante, la cantidad de corriente de la red se incrementará. En la medida que el factor de potencia disminuya.

Esto significa que los transformadores y cables de distribución estarán sobrecargados y que las pérdidas en ellos se incrementarán (en proporción al cuadrado de la corriente).

Se ha visto la considerable influencia que el factor de potencia tiene sobre el valor de la corriente demandada en el sistema.

Este punto en que aumenta la corriente ocasionará muchas desventajas para el usuario industrial, todo lo cual tiene repercusiones financieras. Aumenta las pérdidas por efecto Joule las cuales son una función del cuadrado de la corriente, por ejemplo.

- Los cables entre el medidor y el usuario.
- Los embobinados de los transformadores de distribución.
- Dispositivos de operación y protección.

Un aumento en la caída de voltaje, resultando en un insuficiente suministro de potencia a las cargas (motores, lámparas etc.) estas cargas sufren una reducción en su potencia de salida. Esta caída de voltaje afecta a:

- Los embobinados de los transformadores de distribución.
- Los cables de alimentación
- Sistemas de protección y control.

Las instalaciones no pueden ser usadas a toda su capacidad, esto es particularmente importante en El caso de transformadores de distribución.

Esas desventajas también afectan al productor y al distribuidor de la energía eléctrica, es completamente comprensible, sin embargo que él debe penalizar al usuario con bajo F.P. haciendo que el mismo pague mas por su electricidad.

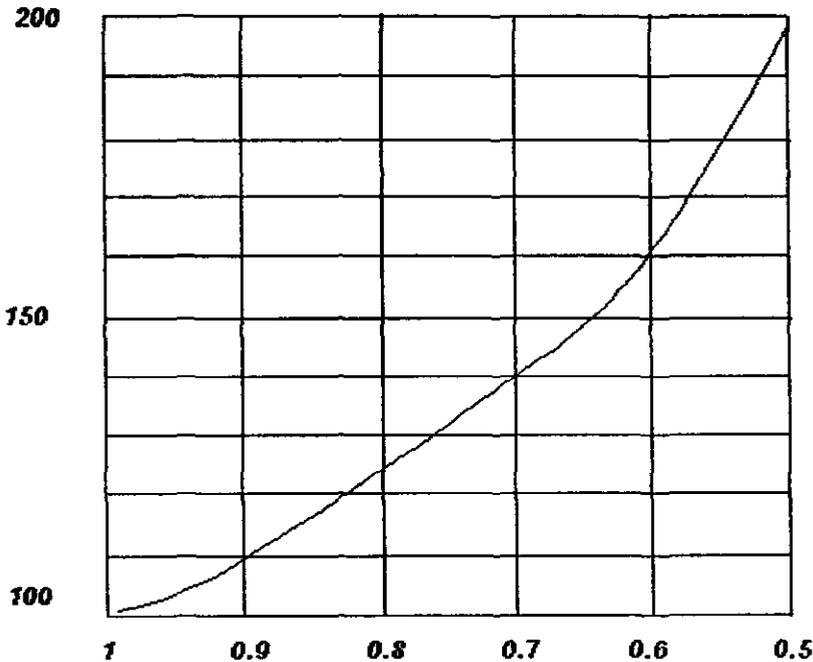


Fig. 2-1. La corriente nominal es afectada por el F.P.

## 2-2 REDUCCION DE PERDIDAS EN LOS CABLES.

Para la misma potencia activa transmitida una mejora en el factor de potencia significa una reducción en la corriente principal.

Para un cable dado, las pérdidas son proporcionales al cuadrado de la corriente. Al mejorar el factor De potencia de un valor inicial  $\text{Cos } \Phi_1$  a un valor  $\text{Cos } \Phi_2$ , las pérdidas  $I^2 R$  en watts pueden ser reducidas por un factor.

$$K = \left[ 1 - \left( \frac{\text{Cos } \Phi_1}{\text{Cos } \Phi_2} \right)^2 \right] \times 100 \quad (69)$$

Se ve que una mejora del  $\text{Cos } \Phi$  de 0.6 a 0.8 reduce las pérdidas en 44% y una mejora de 0.6 a 1.00 resultara en una reducción del 64 %. Esto se puede ver gráficamente en la figura 2-2.

El calculo es tan simple como se muestra en este ejemplo:

Supongase que se tiene una instalación que alimenta a un grupo de bombas. El motor esta clasificado en 37 kw a 380V, Y tiene un  $\text{Cos } \Phi = 0.72$ . El cable alimentador es de 35 mm. Cuadrados con una longitud de 180 metros. La instalacion esta en servicio 480 horas/mes.

¿ Cual es el ahorro anual en kw cuando el factor de potencia es mejorado de 0.72 a 0.95 ?

1.- Primero se determina la corriente.

a) Con  $\text{Cos } \Phi = 0.72$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}V\text{Cos}\Phi} = \frac{37000}{\sqrt{3}(380v)(0.72)} = 78A$$

b) Con  $\text{Cos } \Phi = 0.95$

$$I = \frac{37000}{\sqrt{3}(380v)(0.95)} = 59A$$

2.- Resistencia del cable (por Fase).

La tabla para las pérdidas del cable dan para 35 mm cuadrados 0.0005 ohm/metro. Resistencia total 0.09 Ohm. Vease tabla 2-1.

3.- Pérdidas térmicas.

a) Con  $\text{Cos } \Phi = 0.72$

$$P = 3RI^2 = 3(0.09)(78A)^2 = 1643Watts$$

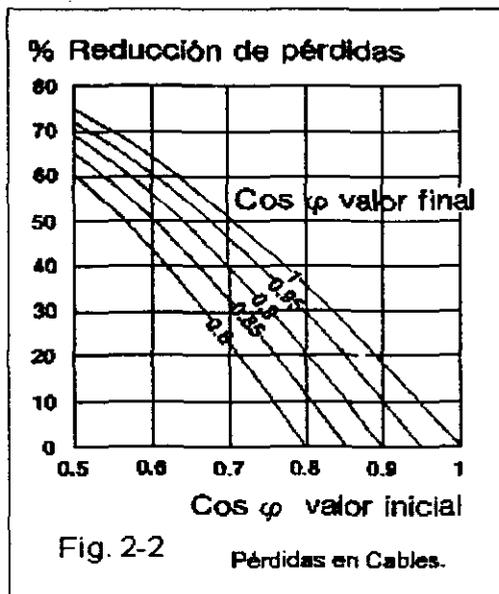
b) Con  $\text{Cos } \Phi = 0.95$

$$P = 3RI^2 = 3(0.09)(59)^2 = 940watts$$

4.- Diferencia en consumo anual de energia.

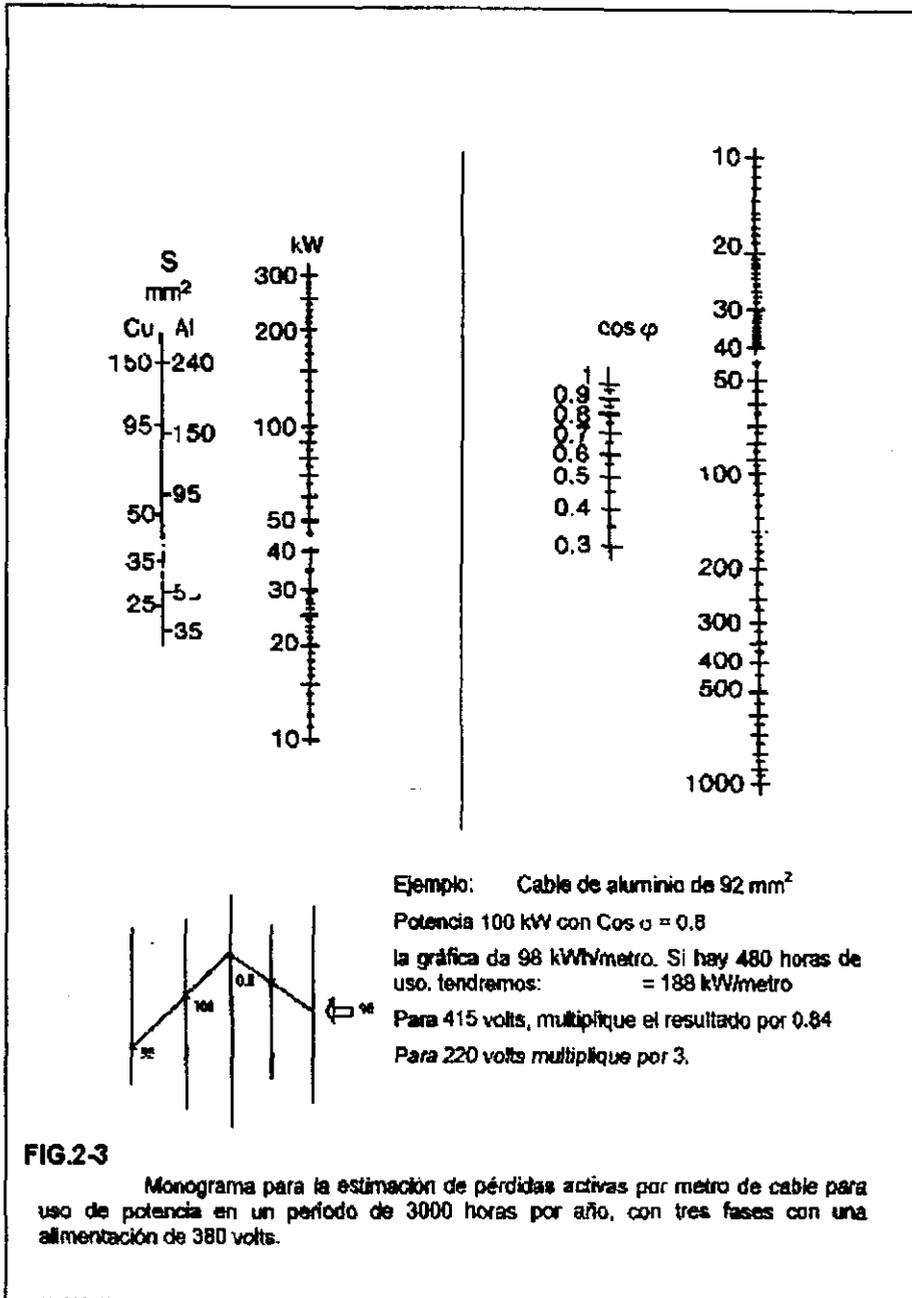
$$\frac{703(480)(12)}{1000} = 4050KWH / AÑO$$

Este ahorro representa el 2% de la cantidad consumida, solamente por rubro minimo de perdidas en cables.



RESISTENCIA A 20° C EN ALAMBRE DE COBRE.					
Diámetro (mm)	Área de sección (mm <sup>2</sup> )	Peso (Kg/ Km)	Resistencia en ohms/metro		
			Alambre de cobre suave	Alambre de cobre estirado en frío	De acuerdo a estándares
0.05	0.00196	0.017	8.949	9.276	8.796
0.10	0.00785	0.070	2.234	2.316	2.196
0.20	0.3142	0.280	0.558	0.579	0.549
0.30	0.07096	0.629	0.248	0.257	0.244
0.40	0.1257	1.12	0.140	0.145	0.137
0.50	0.1964	1.75	0.0893	0.0926	0.0878
0.60	0.2827	2.52	0.0620	0.0643	0.0610
0.70	0.3848	3.43	0.0456	0.0472	0.0448
0.80	0.5027	4.47	0.0349	0.0362	0.0343
1.00	0.7854	6.99	0.0223	0.0227	0.0220
1.13	1	8.9	0.0175	0.0179	0.0172
1.12	1.31	10.07	0.0155	0.0158	0.0152
1.38	1.5	13.35	0.0117	0.0119	0.0115
1.50	1.767	15.73	0.00993	0.0101	0.00976
1.78	2.5	22.3	0.00702	0.00714	0.00690
2.00	3.142	28	0.00558	0.00568	0.00549
2.26	4	35.6	0.00439	0.00447	0.00431
2.60	5.309	47.3	0.00330	0.00336	0.00325
2.76	6	53.4	0.00292	0.00298	0.00287
3.00	7.069	62.9	0.00248	0.00253	0.00244
3.20	8.042	71.6	0.00218	0.00222	0.00214
3.40	9.079	80.8	0.00193	0.00197	0.00190
3.57	10	89	0.00175	0.00179	0.00172
4.52	16	142.4	0.00110	0.001116	0.001075
5.63	25	222.5	0.000702	0.000715	0.000688
6.67	35	311.5	0.000502	0.000510	0.000491
7.97	50	445	0.000351	0.000357	0.000344
11.00	95	846.5	0.000185	0.000188	0.000181

Tabla 2-1. Resistencia de alambre de cobre.



### 2-3 REDUCCION DE PERDIDAS EN TRANSFORMADORES.

Las pérdidas en un transformador son de dos clases : pérdidas en el hierro ( núcleo) y pérdidas en el bobinado cobre. Las pérdidas en el núcleo corresponden aproximadamente a la potencia disipada en el transformador bajo condiciones sin carga. Las pérdidas en el cobre varían con el cuadrado de la corriente y están directamente relacionadas con el factor de potencia.

Las pérdidas totales (  $P_T$  ) son iguales a las pérdidas en el núcleo (Pfe) más las pérdidas en el cobre (Pcu) a plena carga; si el transformador no trabaja a plena carga, las pérdidas eléctricas deberán ser corregidas por la relación al cuadrado de las potencias a la carga dada dividida por la potencia a plena carga como se muestra en la siguiente ecuación:

$$P_T = P_{fe} + P_{cu} \left( \frac{\text{Pot. a la carga}}{\text{pot. a plena carga}} \right)^2 \quad (70)$$

Ejemplo :

Se tiene un transformador de 500 KVA con pérdidas normales dando 300 kw con un factor de potencia de 0.7, utilizando la ecuación (70) y buscando Pfe y Pcu en la figura 2-4.

$$P_{fe} = 1.20 \text{ kw}$$

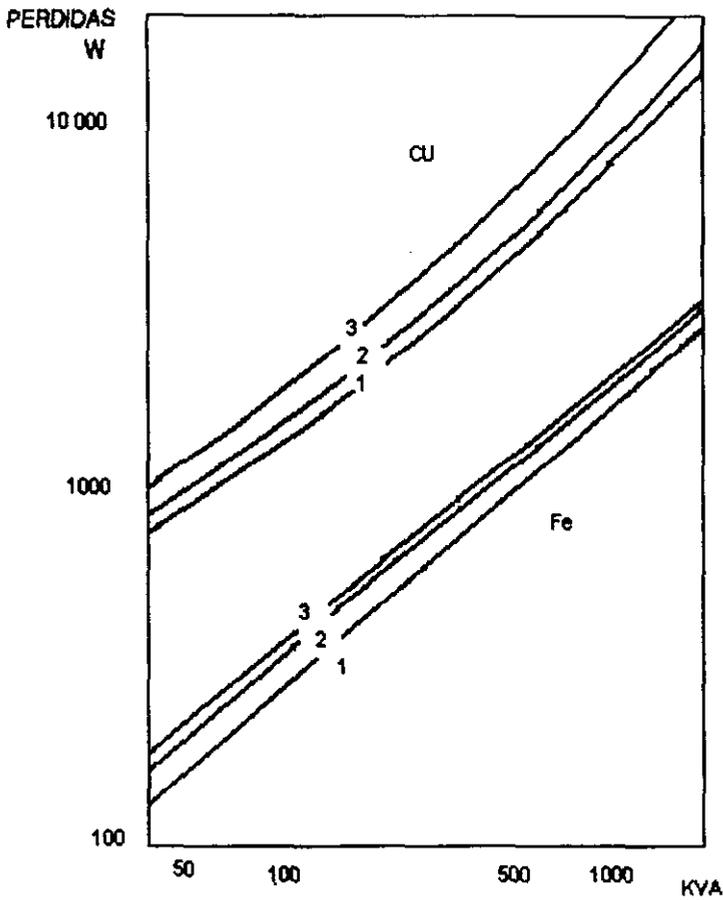
$$P_{cu} = 6 \text{ kw}$$

$$\text{Pot. A la carga} = 300 \text{ watts}$$

$$\text{Pot a la plena carga} = 0.7 \times 500 \text{ KVA}$$

$$P_T = 1,20 + 6 \left( \frac{300}{0.7 \times 500} \right)^2 = 5.6 \text{ Kw}$$

Si el factor de potencia puede ser mejorado en la unidad, las pérdidas pueden ser reducidas a 3310 watts y una ganancia de 2.27 kw puede lograrse, lo que multiplicado por las horas de uso daría un importante ahorro de energía.



3 = Transformador con Pérdidas normales

2 = Transformador con pérdidas bajas.

1 = Transformador con pérdidas extrabajas

Valores de las pérdidas del núcleo y del embobinado de los transformadores en función de su salida nominal.

Fig. 2-4

#### 2-4. MEJOR REGULACION DE VOLTAJE EN TRANSFORMADORES:

Un transformador tiene una resistencia primaria, una resistencia secundaria y una inductancia sobre el primario y sobre el secundario.

En la práctica se hace una prueba de corto circuito en la cual se determina el valor del voltaje primario (expresado como un porcentaje del voltaje nominal) necesario para dar la corriente nominal sobre el lado secundario en cortocircuito. Este valor puede variar dependiendo del tipo de transformador entre 2 y 12 %. Esto esta generalmente alrededor del 5% para transformadores de distribución.

El voltaje de cortocircuito es usado para determinar el valor relativo de la caída de voltaje resistivo ( $AV_r$ ) y la caída del voltaje inductivo ( $AV_s$ ). En la práctica la caída de voltaje relativo en porcentaje es siempre más pequeña que el voltaje de cortocircuito. Esta caída de voltaje esta directamente relacionada con la corriente y varia, asumiendo corriente constante con el factor de potencia.

Con bajo factor de potencia, la caída de voltaje es mas alta. Si el circuito es capacitivo el voltaje de salida del transformador se incrementara.

Supóngase un transformador de 25 KV / 380 V de 1000 KVA con un voltaje de cortocircuito de 5%. ¿ Cómo será el voltaje sin carga si el transformador está conectado solamente con un capacitor de 150 KVAR?

Tenemos que:

$\cos \Phi = 0$  Capacitivo, significa que  $\text{Sen } \Phi = -1$

$AV = 5\%$  de la corriente nominal.

Entonces.

$AV = 5 \times 0.15 = 0.75\%$  para la carga mencionada.

$$V = 380 \times 1.0075 = 383 \text{ V}$$

Es de nuestro interés mantener, en la salida del transformador un factor de potencia tan cercano a la unidad como sea posible. En el caso sin carga, el incremento en voltaje causado por el capacitor es mínimo.

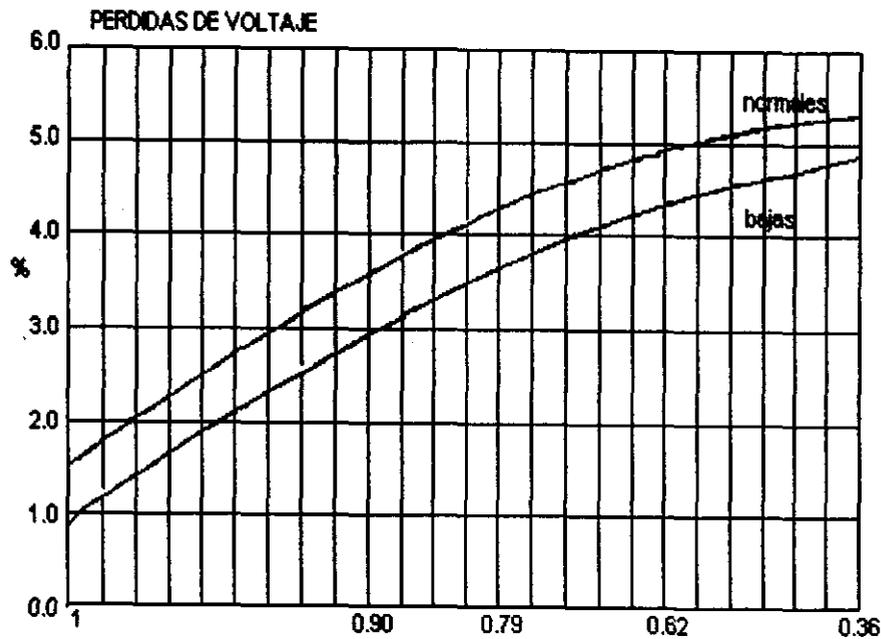


Fig.2-5. CAIDA DE VOLTAJE EN TRANSFORMADORES

## 2.5 LIBERACION DE POTENCIA APARENTE EN EL TRANSFORMADOR.

La potencia aparente que puede ser liberada de un transformador esta expresada en KVA, donde la potencia máxima corresponde, en un voltaje dado a la corriente máxima. Esta es la máxima potencia aparente que un transformador puede entregar. Sin embargo lo que interesa es cuanta potencia activa puede entregar un transformador, por lo que entonces un transformador es mejor utilizado cuando el factor de potencia de la carga esta cercano a la unidad.

La potencia aparente extra aprovechable mientras se mantiene la misma potencia activa puede ser expresada por:

$$KVA = KW \left[ \frac{1}{\cos\Phi_1} - \frac{1}{\cos\Phi_2} \right] \quad (71)$$

Un transformador de 400 KVA con una carga de 200 KW con un factor de potencia  $\cos\Phi = 0.5$ , esta cargado a su máximo. Si el factor de potencia puede ser mejorado a 0.8, otros 150 KVA serán aprovechables.

Y si el factor de potencia puede ser mejorado en otro paso hasta 1 otros 50 KVA se aprovecharan. Esto muestra que tan importante es mantener el factor de potencia en la salida del transformador tan cercano a la unidad como sea posible.

El factor de potencia interviene directamente en la elección de la capacidad de un transformador. Tomando una carga unitaria real conectada al transformador y considerando diferentes valores del factor de potencia de la carga; en la siguiente tabla se puede apreciar el incremento de la potencia del transformador conforme baja el factor de potencia.

1.00	1.00	1.000
1.00	0.95	1.052
1.00	0.90	1.111
1.00	0.85	1.176
1.00	0.80	1.250
1.00	0.75	1.333
1.00	0.70	1.428
1.00	0.65	1.538
1.00	0.60	1.666
1.00	0.55	1.818
1.00	0.50	2.000

Tabla 2-2. En la tabla se muestra como al tener un factor de potencia bajo la potencia requerida en el transformador aumenta.

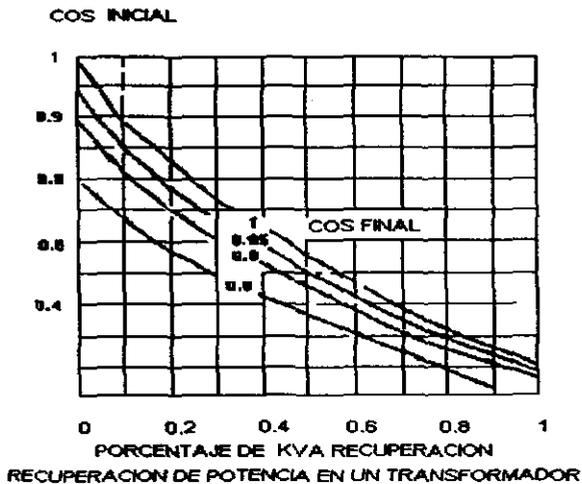


Fig. 2-6

## 2.6 MENOR CAÍDA DE VOLTAJE EN LOS CONDUCTORES.

Una línea de transmisión esta eléctricamente constituida de una resistencia y una inductancia en serie, la caída de voltaje en la línea de transmisión ( $\Delta V$ ) con una frecuencia ( $\omega$ ) a través de la cual una corriente con ángulo de fase  $\Phi$  fluye esta dada por:

$$\Delta V = I(R\cos\Phi + \omega L\text{Sen}\Phi) \quad (72)$$

Para una red trifasica en donde la caída de voltaje máxima permitida en  $n\%$ , la potencia máxima que puede ser transmitida es:

$$P = 3VI\cos\Phi \quad (73)$$

$$\Delta V = \frac{nV}{3} \quad (74)$$

Lo cual da:

$$P = \frac{nV^2}{R + \omega L\text{Tg}\Phi} \quad (75)$$

En la práctica, el valor  $n$  esta entre 5 y 10 %.

Como se puede observar en la figura 2-6, iniciando con  $\cos\Phi = 0.4$  la capacidad de la línea aumenta casi linealmente hasta el valor  $\cos\Phi = 0.8$ , de ahí aumenta aun más rápidamente. La potencia transmitida para una caída de voltaje dada, puede ser duplicada cuando se corrige el  $\cos\Phi$  de 0.65 a 1.

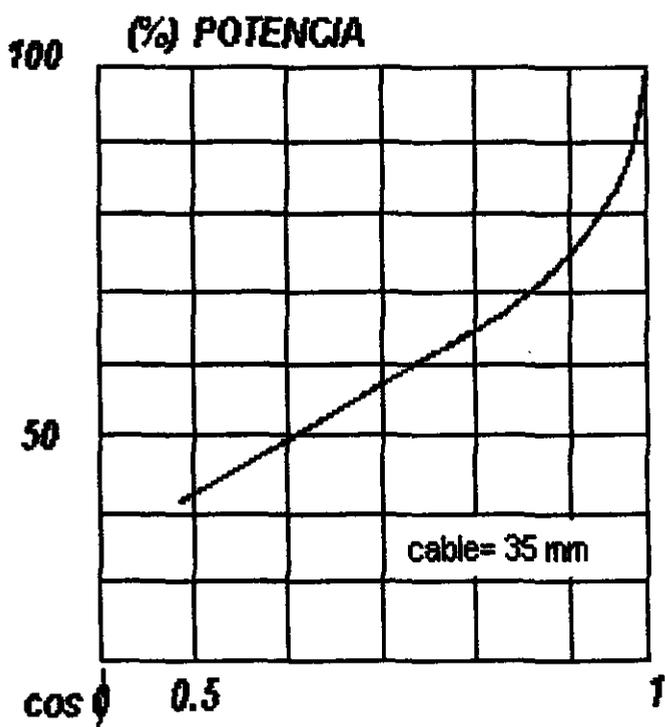


Fig. 2-7. CAIDA DE VOLTAJE EN CABLES

## CAPITULO TRES

### COMPENSACION DEL FACTOR DE POTENCIA MEDIANTE BANCOS DE CAPACITORES

#### 3.1 EL CAPACITOR.

Los capacitores son componentes electrónicos importantes en la técnica de energías, Telecomunicaciones etc. Se utilizan por ejemplo:

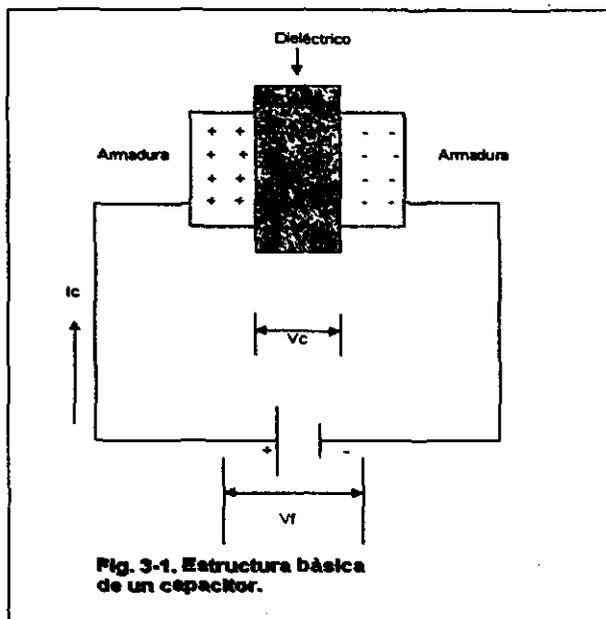
- Para bloquear corriente continua
- Para rectificación de tensiones
- Como resistencias dependientes de frecuencia
- Para circuitos oscilantes en la técnica de energías y en radio.
- Como capacitor antiparásito
- Para el arranque y funcionamiento de motores.
- Para la compensación de la potencia reactiva inductiva
- Como almacenadores de energía electrostática.

La función de un condensador es la de almacenar energía eléctrica en forma de campo eléctrico.

Todo condensador consta de dos superficies metálicas conductoras, expuestas a una distancia entre sí y aisladas una de la otra. Las superficies metálicas se denominan electrodos o armaduras, la capa aislante entre las armaduras recibe el nombre de dieléctrico.

Si se somete un condensador descargado a tensión continua, los electrones se desplazan desde el polo negativo de la fuente eléctrica hasta el condensador. La misma cantidad de electrones se desplaza desde el condensador a través de la línea hasta el polo positivo. Por lo tanto en una de las armaduras aparecerá un exceso de electrones (-) en la otra una falta de electrones (+). El condensador se carga. El proceso concluirá, cuando se igualen la tensión entre las armaduras  $V_c$  y la tensión de la fuente  $V_f$ . El

movimiento de los electrones se denomina corriente eléctrica. Entre las armaduras aparece un campo eléctrico.



**Fig. 3-1. Estructura básica de un capacitor.**

### 3.1.1 Carga y capacidad del capacitor.

El número de electrones que se desplazan durante el proceso es la carga del condensador. La carga es igual a la cantidad de electricidad de un condensador. Se designa mediante la letra  $Q$  y su unidad en el sistema internacional es el coulomb (C).

La unidad coulomb (C) es equivalente a un ampere-segundo, ya que la intensidad de corriente y el tiempo son los determinantes en la carga de un condensador.

$$\text{Carga} = Q = \text{Intensidad de corriente} \times \text{tiempo}$$

$$Q = I \times t \quad (\text{ampere-segundo}) \quad (76)$$

La tensión también juega un papel importante en la carga del condensador. Si se somete al condensador, por ejemplo, a una tensión doble, la carga se duplica.

La relación existente entre la carga  $Q$  y la tensión  $V$  es una constante que depende de la estructura del condensador y se denomina capacidad o capacitancia.

$$\text{Capacidad} = \frac{\text{Carga del condensador}}{\text{Tensión entre las armaduras}}$$

$$C = \frac{Q}{V} \cdot \frac{(\text{ampere} - \text{seg})}{\text{volts}} \quad (77)$$

Para designar la unidad de la capacitancia en el sistema internacional se utiliza el FARADAY.

$$1F = \frac{1(\text{ampere} - \text{seg})}{\text{volt}}$$

En la práctica aparecen primordialmente fracciones de 1 Faradio.

### 3.1.2 Dependencia de la capacitancia.

A una mayor superficie de la placa corresponde un aumento de la capacitancia (existe mas espacio disponible para la carga.).

La superficie total puede ser incrementada, por ejemplo:

- a) Aumentando cada una de las superficies.
- b) Utilizando una conexión en paralelo de pares de placas.

Por ejemplo en un condensador con seis placas, la superficie total activa es cinco veces mayor que la correspondiente a un par de placas.

Si se reduce la distancia entre las placas, la capacidad aumentara. La distancia entre las placas también influye en la intensidad del campo eléctrico. Con tensión (V) constante, la intensidad del campo eléctrico (E) esta en proporción inversa a la distancia (d) entre las placas.

$$\text{Intensidad del campo eléctrico} = E = \frac{\text{Tensión entre placas}}{\text{Distancia entre placas}}$$

$$E = \frac{V}{d} \left[ \frac{\text{volt}}{\text{metro}} \right] \quad (78)$$

El dieléctrico ejerce una influencia destacable sobre la capacidad de un condensador. Si se llena el espacio entre las armaduras con material aislante en lugar de aire, la capacidad del condensador aumentara.

La causa del aumento de la capacidad es la polarización eléctrica. Las moléculas originalmente desordenadas, del material aislante se alinean en dirección positiva o negativa bajo los efectos del campo eléctrico. Mediante la polarización de las moléculas del material aislante, este se comporta como si en su superficie existiera una carga eléctrica adicional. De esta manera, el condensador puede acoger mayor cantidad de carga con un material aislante como dieléctrico, de la que seria capaz de recibir, a igual tensión con aire como dieléctrico. Mayor cantidad de carga significa mayor capacidad.

Como material aislante se utiliza cerámica, mica, oxido de aluminio papel de celulosa, láminas de plástico, etc. La cifra, que refleja el número de veces que ha aumentado la capacidad de un condensador si se utiliza un material aislante como dieléctrico en lugar de aire se denomina índice de permitividad eléctrica del material, designada ( $\epsilon_r$ ).

La permitividad absoluta (E) de un material aislante es el producto formado por el índice de permitividad (Er) (sin dimensión) y la constante de campo eléctrico (E<sub>0</sub>).

$$E = (E_r)(E_0) \quad (79) \quad \text{donde:}$$

$$E_0 = 0.885 \times 10^{-11} \quad \left[ \frac{f}{m} \right]$$

Por lo tanto, la capacidad de un condensador está en función de la superficie (A) de las placas (armaduras), distancia d entre las placas y de la permitividad absoluta (E) del material aislante utilizado es:

$$C = \frac{(E_0)(E_r)(A)}{D} \quad [\text{Faradios}] \quad (80)$$

### 3.1.3 Capacitor en tensión continua.

Un condensador se carga al conectarlo a tensión continua. En el momento de la conexión, la corriente *i<sub>c</sub>* es de gran intensidad; limitada tan solo por la ínfima resistencia ohmica (R) de las conducciones y del condensador. Al aumentar la tensión (V<sub>c</sub>) en el condensador, *i<sub>c</sub>* disminuye continuamente. Al finalizar el proceso de carga, V<sub>c</sub> = V<sub>f</sub> e *i<sub>c</sub>* = 0, el condensador bloquea a la corriente continua.

El valor máximo alcanzado por la corriente de carga *i<sub>c</sub>* depende únicamente de la tensión continua V y de la resistencia r del circuito eléctrico, pero no de la capacidad.

$$I_{C,max} = \frac{V}{R} \quad (81)$$

Durante el proceso de descarga del condensador, la tensión en el condensador  $V_c$  y la corriente de descarga  $i_c$  se reducen en la misma proporción, alcanzando simultáneamente el valor de cero.

El tiempo  $t$  de carga y descarga de un condensador esta en función de su capacidad  $C$  y de la resistencia ohmica  $R$  del circuito eléctrico. Variando la resistencia  $R$  puede prolongarse o acortarse el proceso de carga y descarga. La constante temporal ( $\tau$ ) es una medida indicadora del tiempo de carga y descarga. Su valor refleja la duración que tarda el condensador en cargarse hasta alcanzar el 63% de la tensión expuesta. Tras un intervalo de  $5\tau$ , el condensador ya estará prácticamente cargado o descargado.

$$\tau = RC \quad [\text{Seg.}]$$

### 3.1.4 Capacitor en tensión alterna.

Conectando un condensador a tensión alterna, sus armaduras se cargan positiva y negativamente de una manera alternativa. Por lo tanto, en el conductor fluye hasta el condensador corriente alterna. Esta corriente fluye aparentemente a través del condensador.

Al igual que en un circuito de corriente continua, el condensador actúa en un circuito de corriente alterna como una resistencia finita pero en este caso, esta resistencia no depende únicamente de la capacidad  $C$  del condensador, sino también de la frecuencia  $f$  de la tensión alterna. Con frecuencias muy altas, la resistencia será muy baja. Con corriente continua ( $f=0$ ), la resistencia es, por el contrario, infinitamente grande. La resistencia de corriente alterna de un condensador se denomina resistencia reactiva capacitiva o reactancia capacitiva  $X_c$ .

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (82)$$

Donde:

$\omega$  = es la frecuencia.

$C$  = es la capacitancia.

Como la ley de ohm también se cumple en el caso de un condensador, se puede obtener la corriente del condensador  $I_c$  a partir de la tensión alterna  $V$  y de la reactancia capacitiva  $X_c$ .

$$I_c = \frac{V}{\omega C} \quad (83)$$

Si sustituimos  $X_c$  en la formula anterior.

$$I_c = V \omega C \quad (84)$$

### 3.1.5 El capacitor monofásico.

La potencia reactiva  $Q$  de un condensador es el producto formado por la tensión  $V$  y la corriente del condensador  $I_c$ . Para un condensador del tipo monofasico Se cumple:

$$Q = V \cdot I_c \quad [\text{Var}] \quad (85)$$

Como  $I_c = V \omega C$  (86) obtenemos:

$$Q = V \cdot V \omega C \quad Q = V^2 \omega C \quad (87)$$

Es frecuente en la técnica de energías, el designar a un condensador indicando su consumo de potencia reactiva en VAR a tensión y frecuencia nominales. La tensión nominal es la referencia, a partir de la cual se calcula y dimensiona el aislamiento entre las armaduras, entre devanado y caja y distancia entre los bornes de conexión.

### 3.2 CONEXIÓN DE CAPACITORES EN PARALELO.

Los capacitores en paralelo pueden ser conectados en cualquiera de las dos formas siguientes.

- a) Delta.
- b) Estrella.

Cada método de conexión debe de estudiarse cuidadosamente de acuerdo con las características propias de cada caso, antes que se decida la aplicación en sistemas eléctricos industriales

#### 3.2.1 Capacitor trifasico en conexión en delta.

Un condensador adecuado para ser utilizado en una red de corriente trifasica, se denomina condensador trifasico. La capacidad total se subdivide en tres capacidades parciales.

Los condensadores trifasicos se utilizan casi siempre en conexiones delta. Este tipo de conexión se realiza primordialmente en el interior de la caja del condensador, Esta posee tres bornes de conexión para las fases R, S, T.

Conectando el condensador a una red trifasica, cada capacidad parcial estará expuesta a la tensión de línea V. La potencia total Q del condensador es pues:

$$Q = 3(V^2)(W)(C_{ind.}) \quad (88)$$

$$Q = V^2WC_{tot.} \quad (89)$$

Como la potencia reactiva Q de un condensador con corriente trifasica es:

$$Q = \sqrt{3}(V)(I_c) \quad (90)$$

Se obtiene la corriente  $I_c$  del condensador en conexión en triángulo a partir de:

$$I_c = \frac{Q}{\sqrt{3}V} \quad (91)$$

Los capacitores de potencia para baja tensión suelen encontrarse en el mercado en forma de unidades trifasicas cuya conexión interna es en delta, interpretándose el voltaje nominal como el voltaje entre fases. Cuando se usan unidades monofasicas, también se conectan en delta, instalándose en bancos de tres unidades o múltiplos de tres.

La razón de efectuarse la conexión delta es la de aprovechar mejor el dieléctrico con que están fabricados los capacitores, aplicándoles el máximo voltaje posible.

En alta tensión, la conexión en delta se reduce, ya que la interconexión entre bastidores son más complicadas, lo que ocasiona un uso mayor de materiales; además de que los fusibles individuales de los capacitores deben ser capaces de interrumpir la corriente de corto circuito del sistema en caso de falla. Todo lo anterior se traduce en un costo más elevado.

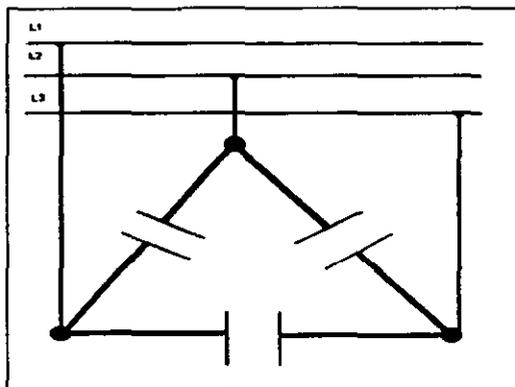


Fig. 3-2 Capacitor trifásico en delta.

### 3.2.2 Capacitor trifasico en conexión estrella.

Otra posibilidad de conexión de un condensador trifasico es la conexión en estrella. Sin embargo, este tipo de conexión no tiene sentido utilizarlo con bancos capacitores de baja tensión, ya que cada capacitor estará expuesto a la tensión simple:

$$V_{simple} = V / 1.73$$

Por lo tanto, a la misma tensión de la línea  $V$ , la potencia reactiva de un condensador trifasico en conexión en estrella resulta tan solo  $1/3$  que la obtenida con conexión en triángulo. Sin embargo, la conexión en estrella se adecua para condensadores de alta tensión, pues ofrece la ventaja de tener que dimensionar el aislamiento únicamente en función de la tensión simple.

Normalmente los bancos de capacitores en alta tensión se conectan en estrella, en 2 combinaciones; de neutro flotante o neutro conectado a tierra.

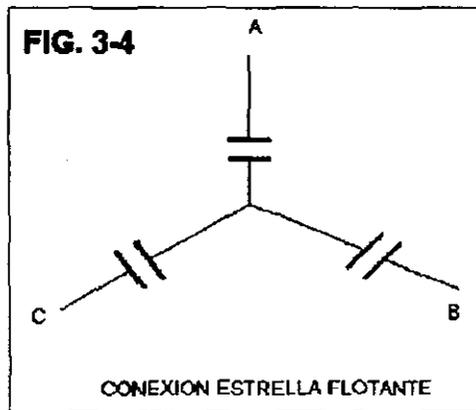
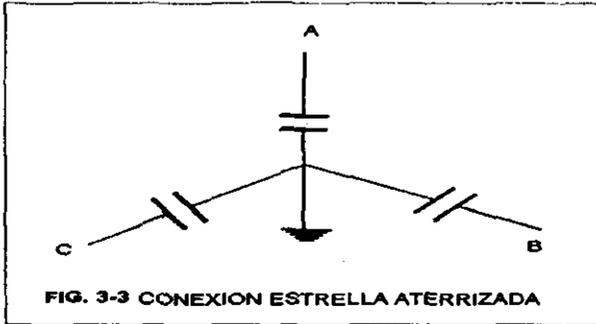
La decisión de dejar el neutro flotante o conectado a tierra ésta sujeta, principalmente, a las consideraciones siguientes:

**Conexión a tierra del sistema.** Los capacitores deben conectarse con el neutro flotante siempre que se instalen en sistemas aislados o con los neutros de los transformadores, conectados a tierra. De esta forma se limita el paso de corrientes armónicas excesivas a través de los capacitores.

A veces, puede resultar conveniente el conectar el neutro a tierra, ya sea para facilitar el accionamiento de los fusibles, o bien, para limitar sobrevoltajes excesivos en los momentos de conexión y desconexión de bancos de capacitores instalados en líneas de un voltaje elevado. Esta conexión solo puede efectuarse cuando se instalan los capacitores en líneas conectadas a tierra en múltiples puntos, o en las subestaciones con los neutros de los transformadores conectados a tierra directamente.

Sin embargo, la conexión con neutro flotante resulta recomendable incluso para los capacitores en sistemas ligados a tierra, ya que para ciertas relaciones de impedancia de

estos sistemas, un fallo en las líneas puede originar sobrevoltajes peligrosos para el banco de capacitores, si su neutro se encuentra conectado a tierra.



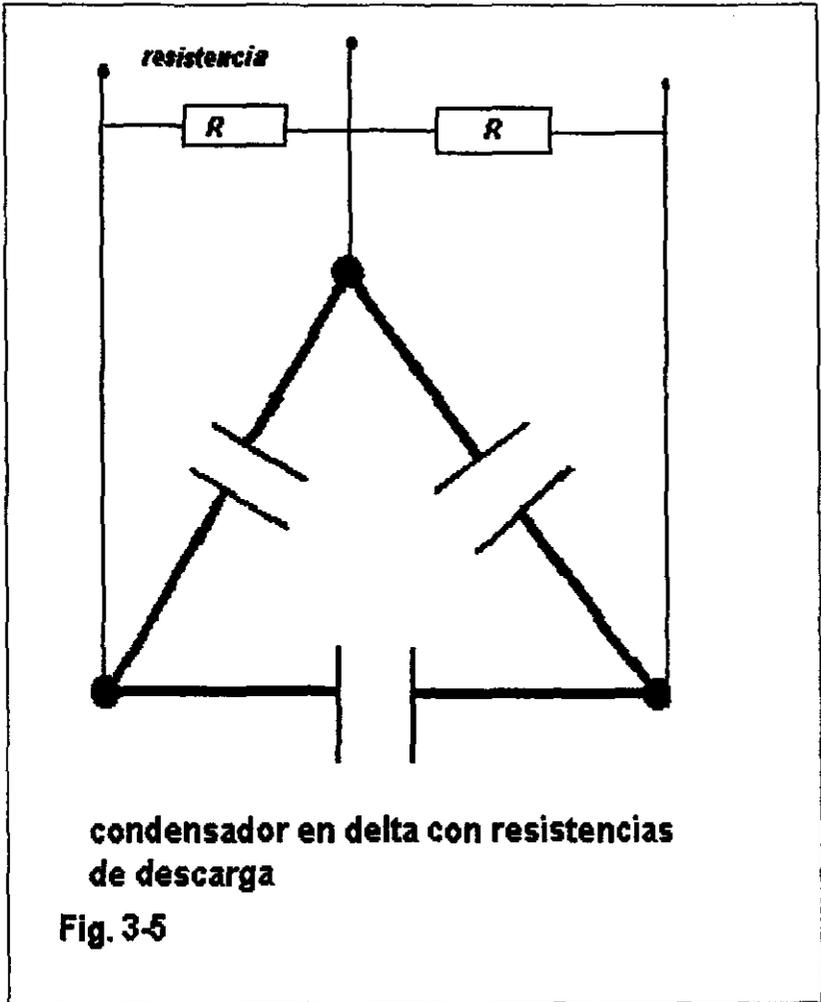
### 3.2.3 Descarga de capacitores.

Si se interrumpen las condiciones entre el condensador y la fuente de tensión continua, se conserva la energía eléctrica almacenada en el campo eléctrico del condensador. Al desconectar un condensador de una red de tensión alterna, también suele retenerse una carga en el condensador, ya que raramente se producirá la desconexión justa en el momento en el que la tensión es cero. La carga eléctrica puede ser retenida durante varias horas, debido a la resistencia aislante del dieléctrico del condensador. Si se tocan los bornes de un condensador desconectado, pero total o parcialmente cargado, pueden producirse peligrosos accidentes.

Cortocircuitando sus bornes, puede descargarse un condensador violentamente. Esto debería evitarse, pues el esfuerzo al que se somete al condensador mediante esta altísima corriente de descarga, puede llegar a deteriorarlo. Es preferible el efectuar el proceso de descarga con la ayuda de resistencias óhmicas adecuadas.

El productor de condensadores de potencia suele dotar previamente al condensador con estas resistencias de descarga. Estas están calculadas, para que la tensión remanente al desconectar un condensador, se reduzca a menos de 50 volts en un minuto.

Se utilizan altas resistencias óhmicas, ya que tienen que estar expuestas a tensión durante todo el tiempo de servicio del condensador. Teóricamente también se podrían utilizar resistencias bajas, pero sufrirían pérdidas mayores y, por lo tanto, calentamiento no deseado.



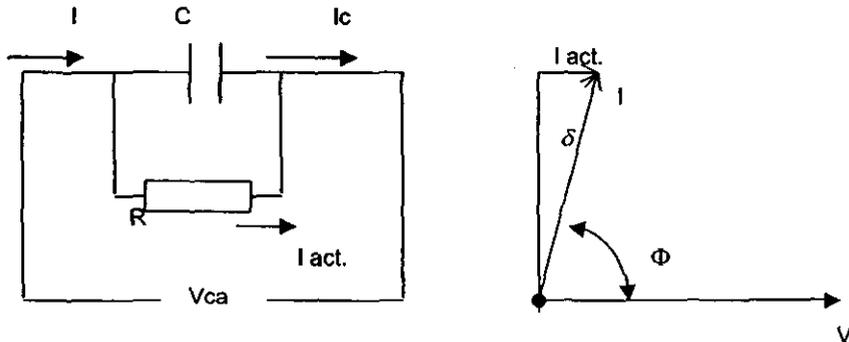
3.2.4 Factor de pérdida, potencia de pérdida.

En un condensador imaginario sin ningún tipo de pérdida, el ángulo de desfase, es decir el ángulo  $\Phi$  entre la corriente  $I$  y la tensión  $V$ , es de  $90^\circ$ . Sin embargo, todos los condensadores reales sufren pérdidas en el dieléctrico, en las armaduras y en los conductores. Por lo tanto, el ángulo de desfase en un condensador no será de  $90^\circ$  adelantado, sino que la corriente  $I$  se adelantará con respecto a la tensión  $V$  según el ángulo  $\Phi = 90^\circ - \delta$ . El ángulo  $\delta$  se denomina ángulo de pérdida, la tangente del ángulo de pérdida es el factor de pérdida dieléctrica.

Se pueden representar las pérdidas sufridas en un condensador mediante una resistencia de pérdida  $R$ . Como todas las pérdidas se realizan en forma de energía calorífica,  $R$  es una resistencia activa. Se cumple la relación:

Factor de pérdida =  $\text{Tan } \delta = \text{corriente activa } (I_a)$ . Dividida por la corriente del condensador  $I_c$ ,

$$\text{Tan } \delta = \frac{I_{act.}}{I_c} \quad (92)$$



En una conexión en paralelo, las corrientes se comportan de manera inversa a las resistencias, es decir.

$$\frac{I_{act}}{I_c} = \frac{X_c}{R} \rightarrow \tan \delta = \frac{X_c}{R} = \frac{1}{W.C.R}$$

La potencia de pérdida  $P_p$  de un condensador es:

$$P_p = V.I.Cos\beta = VISen\delta = QTan\delta \quad (\text{watts}) \quad (93)$$

### 3.3 CLASIFICACION DE CAPACITORES DE POTENCIA.

Los capacitores de potencia se clasifican en diferentes, tipos dependiendo cada uno de los requerimientos y necesidades de las instalaciones eléctricas fig. 3-6.

Los capacitores de potencia se clasifican por su voltaje de operación en dos tipos que son:

- Alta Tensión.
- Baja Tensión.

Esto lo especifican las normas internacionales y nacionales en particular la norma oficial Mexicana NOM-J-203 de 1980

El capacitor de alta tensión se caracteriza por ser un dispositivo que trabaja a un voltaje mayor a 660 volts.

El capacitor de baja tensión se caracteriza por ser un dispositivo que trabaja a un voltaje menor a 660 volts.

Al hablar de voltaje significa los niveles de aislamiento a los cuales debe operar el capacitor teniendo en cuenta que su dieléctrico y aislamiento lo deben de soportar sin sufrir daños o modificaciones en su construcción, es decir arcos eléctricos provocados por una ruptura de aislamiento propiciado una falla.

B) el capacitor de potencia se clasifica por su conexión interna en:

- *Monofasico.*
- *Trifasico.*

Se llama capacitor monofasico porque finalmente sus terminales de salida son dos: una fase y la otra al neutro.

El capacitor trifasico puede tener dependiendo de su conexión interna ya sea delta o estrella, tres o cuatro terminales, esto es determinado por las condiciones del sistema y uso que se pretenda.

C) El capacitor de potencia se clasifica por su servicio:

- *Uso intemperie.*
- *Uso interior.*

Los capacitores para uso intemperie normalmente se utilizan en alta tensión, los cuales están diseñados para soportar las condiciones del lugar de la instalación (medio ambiente y condiciones eléctricas), respetando lo que especifican las normas nacionales e internacionales; para operar adecuadamente tanto en condiciones normales y extremas para las cuales se diseño.

En baja tensión no son muy frecuentes los capacitores uso intemperie, debido a que operan con voltajes bajos y ocupan un área pequeña en comparación con los capacitores de alta tensión, y estos son colocados dentro de gabinetes, por lo cual se les designa para *uso interior, de igual forma respetando las normas nacionales e internacionales.*

D) los capacitores de potencia pueden ser fabricados de dos tipos:

- *Seco.*
- *Sumergido en aceite.*

En alta tensión únicamente se encuentran sumergidos en aceite, ya que se trabaja con gradientes de potencial eléctricos mayores, lo que significa un desgaste mayor en aislamiento y dieléctrico; el capacitor tipo seco es inestable y con una probabilidad mayor de falla, por lo que se menciono anteriormente, que la actual tecnologia de capacitores

en alta tensión es la combinación de un dieléctrico como lo es el polipropileno rugoso con un fluido sintético como lo es el wemcol (aceite), el cual nos permite trabajar a gradientes de potencial eléctricos mayores, teniendo como resultado un capacitor más compacto, confiable y económico cumpliendo con las especificaciones de la norma NOM-J-203, dependiendo del voltaje de operación.

En baja tensión por lo general se utilizan los dos tipos, ya que se trabaja en condiciones de operación con gradientes de potencial eléctricos bajos, los cuales nos permiten tener menor aislamiento con respecto a la alta tensión.

Las diferencias en baja tensión entre un capacitor tipo seco y un capacitor sumergido en aceite son las siguientes:

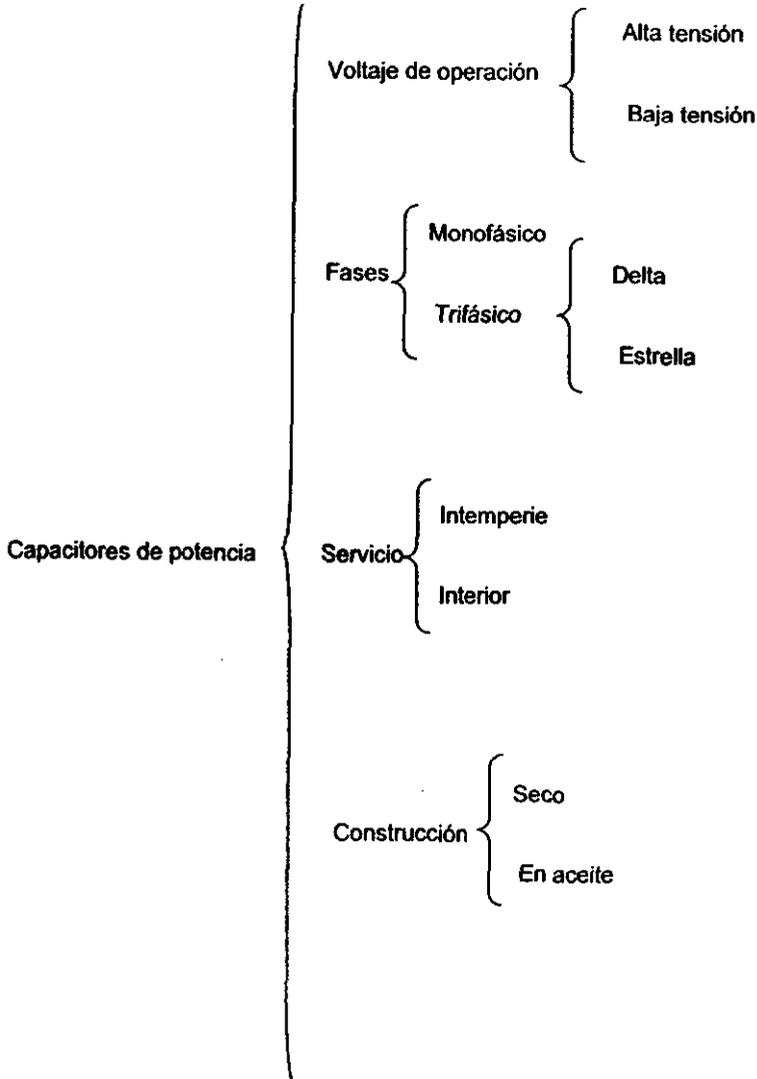
**Estabilidad térmica.** El capacitor de potencia tipo seco es un dispositivo inestable en función de la temperatura es decir que su capacidad de diseño (capacitancia)Varia en función de la temperatura.

En cambio los capacitores sumergidos en aceite permanecen estables en función de la temperatura, esto es debido a que el aceite actúa como medio refrigerante y aislante, para mantener una temperatura uniforme en cualquier punto del capacitor.

**Vida media útil.** La temperatura para cualquier equipo eléctrico al paso del tiempo deteriora el aislamiento, por lo que el capacitor tipo seco al no tener un medio refrigerante propio como lo es el aceite tiene una vida útil menor en comparación con el capacitor sumergido en aceite, ya que la temperatura interna del capacitor es la suma de la temperatura del medio ambiente mas la temperatura tomada por condiciones de puesta en servicio (interna) del capacitor. Aproximadamente la duración de vida media útil de un capacitor tipo seco es una tercera parte del sumergido en aceite en las mismas condiciones de operación.

**Costo.** El capacitor tipo seco es más económico que un tipo sumergido en aceite, debido a que este ultimo contiene más accesorios como es el recipiente contenedor de aceite, tapa, juntas de sello y clips de fijación; en cambio el tipo seco tiene un recipiente

conteniendo la parte activa y se llena de resinas o cualquier otro material de propiedades dieléctricas.



ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

### 3.4 ESPECIFICACIONES NECESARIAS DE UN CAPACITOR.

Las normas establecen que los capacitores de potencia independientemente de su clasificación deben de contar con una especificación que indique las características del mismo (placa de características) y que debe contener como mínimo los siguientes datos.

- Fabricante.
- Año de fabricación.
- Potencia en KVAr.
- Voltaje nominal.
- Frecuencia nominal.
- Temperatura de operación.
- Resistencia de descarga.
- Número de fases.
- Nivel de aislamiento.
- Fusibles internos.

Las temperaturas máximas y mínimas del medio ambiente permisibles para todos los capacitores son:

- Disposición en una hilera: máxima de 46°C.
- Disposición en varias hileras: máxima de 40°C.
- La temperatura mínima de energización es: -40°C.

Los capacitores se diseñan para operar en condiciones de esfuerzos eléctricos comparativamente altos y a plena carga continua; por lo que se deben definir los límites permisibles de sobrevoltaje. En consecuencia los capacitores se fabrican para operar con un voltaje entre sus terminales, incluyendo las armónicas, del 110 por ciento del voltaje nominal para operación continua o en intervalos, excluyendo transitorios.

**Tensión de servicio.** Los capacitores deben ser adecuados para conectarse a un circuito, ya sea entre fases o entre fases y neutro o a circuitos con neutro sólido a tierra, que correspondan a sus límites de tensión.

Los capacitores y cualquier dispositivo automático u otro aparato regulador que tengan conectados, deben resistir permanentemente la tensión de valor eficaz entre las terminales (incluyendo el valor eficaz de las armónicas, pero excluyendo las tensiones originadas por transitorios) hasta de un máximo de 10 por ciento arriba de la tensión nominal.

**Tensión máxima de trabajo.** La tensión máxima de trabajo debe ser igual al 110 por ciento de la tensión nominal. Los valores de cresta de la tensión máxima de trabajo no deben exceder de más de 56 por ciento el valor de la tensión nominal.

Los capacitores deben estar diseñados para trabajar en servicio continuo a la potencia reactiva nominal, a condición de que les sea aplicadas la tensión y la frecuencia nominales.

Los capacitores deben entregar al circuito una potencia reactiva no menor a la nominal y no mayor a un 115 % de esta, a tensión y frecuencia nominales, cuando el capacitor se encuentre a una temperatura de 25°C.

**Potencia máxima de operación.** Los capacitores deben operar satisfactoriamente hasta 135% de su potencia nominal esta potencia máxima debe incluir además de la nominal, la suma de las siguientes componentes:

- 1) Potencia reactiva debida a exceso de tensión, a la frecuencia nominal.
- 2) Potencia reactiva debida a tensiones, a otras frecuencias o armónicas sobrepuestas a la frecuencia fundamental.
- 3) Potencia reactiva en exceso, debido a las tolerancias de manufactura.

**Dispositivos de descarga.** Los capacitores deben contar normalmente con dispositivos de descarga conectados entre sus terminales en forma permanente. Dichos dispositivos deben ser capaces de soportar todas las condiciones normales de operación del capacitor.

Los dispositivos de descarga deben estar diseñados para descargar al capacitor de tal manera que en el tiempo máximo de descarga indicado en la siguiente tabla, la tensión entre terminales haya disminuido a un valor igual o menor a 50 volts.

TENSION NOMINAL EN VOLTS	TIEMPO MAXIMO DE DESCARGA EN MINUTOS
HASTA 600	1.00
ARRIBA DE 600	5.00

**Tabla 3-1. Tiempo máximo de descarga para bancos de capacitores.**

Los capacitores que estén sujetos a control automático, deben estar provistos de dispositivos de descarga que reduzcan la tensión residual por lo menos al 10% de la tensión nominal, dentro del periodo de conexión y desconexión, a menos que el fabricante recomiende algún otro arreglo cuyos resultados sean equivalentes.

Se recomienda que el dispositivo de descarga forme parte integral del capacitor. En caso de excepción, esta debe estar indicada en placa de datos.

**Resistencia a sobretensiones.** Los capacitores deben resistir sin sufrir daño, la aplicación de una tensión alterna o directa entre terminales y recipiente, durante 10 segundos. Esta tensión debe ser senoidal de 10 a 70 hz y de valor igual al doble de la tensión nominal del capacitor; cuando se aplica una tensión directa debe ser de un valor igual 4.3 veces el valor de la tensión alterna nominal del mismo.

**Pérdidas dieléctricas permisibles.** Cuando las pérdidas dieléctricas se expresan en función del valor de la tangente del ángulo de pérdidas dieléctricas, ésta no debe exceder en más del 10% del valor convenido entre fabricante y comprador y no debe ser mayor de 0.003 a 20°C y 50 hz ó 0.0025 a 25°C y 60 hz, para capacitores de alta tensión

en aceite mineral y de 0.0045 a 20°C Y 50 HZ ó 0.0035 a 20°C y 60 hz para capacitores de alta tensión, con impregnantes clorados.

**Estabilidad térmica.** Los capacitores se consideran térmicamente estables, cuando la temperatura máxima del recipiente del mismo llega y permanece en un valor constante, con una variación máxima dentro de 3°C en un periodo de 2 horas.

**Valores de diseño de los dieléctricos.** Los aislamientos de los capacitores deben soportar sin sufrir daño, la aplicación entre terminales, de una tensión de corriente directa cuyo valor sea de 6.25 veces la tensión nominal de corriente alterna, aplicada durante 10 segundos, estando el capacitor a una temperatura de 25 +/- 5°C.

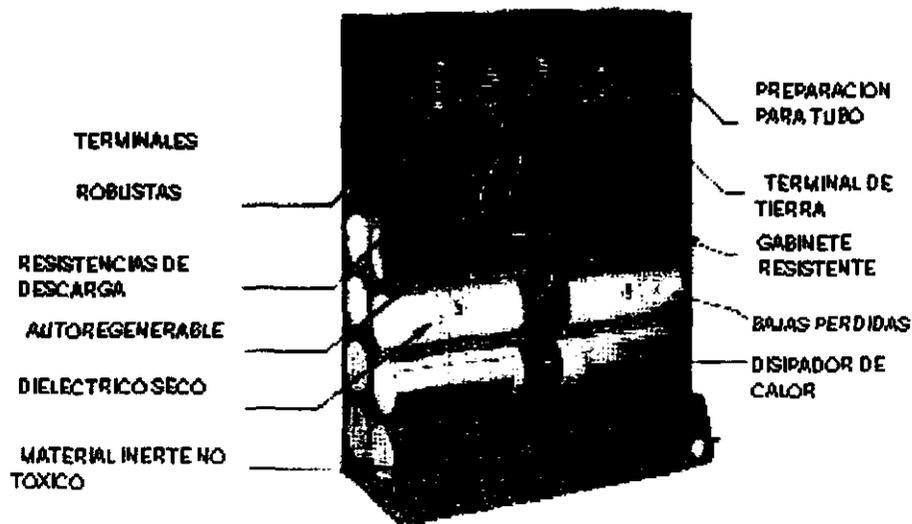


FIG. 3-6 COMPONENTES DE UN BANCO DE CAPACITORES

### 3.5 TIPOS DE COMPENSACION.

Una vez que se ha visto la conveniencia de la instalación de capacitores, es claro, que es de suma importancia localizar el punto mas adecuado para la instalación de los mismos.

Dos pasos que ayudan a seleccionar la localización correcta de los bancos de capacitores son:

1. Encontrar los beneficios que los capacitores pueden producir en variar su localización.
2. Comparar el costo de capacitores instalados en diferentes puntos con el beneficio que producen.

De acuerdo a las necesidades de potencia reactiva de la instalación, la compensación de potencia reactiva puede hacerse desde diferentes puntos, ya sea que se quiera compensar toda la carga conjunta o que se compense localmente en los puntos que se presentan mayores problemas de factor de potencia. De esta forma se identifican diferentes formas de compensación.

Las cargas inductivas se ven compensadas por la conexión en paralelo de condensadores; por ello, se dice que se trata de una compensación en paralelo. Esta es la forma mas utilizada de compensación, sobre todo en instalaciones con corriente trifasica. Existen principalmente tres tipos de compensación:

1. Compensación individual. Se asocia un condensador a cada una de las distintas cargas inductivas. La compensación individual se utiliza preferentemente en el caso de grandes cargas con una gran duración de conexión.
2. Compensación en grupo. Varias cargas inductivas de igual potencia en medida de lo posible y duración de conexión se toman en grupo, compensándose su

potencia reactiva mediante un condensador común. La compensación en grupo se utiliza preferentemente para compensar lámparas de descarga.

3. **Compensación central.** La potencia reactiva de un gran número de cargas individuales de distintas potencias y con diferentes periodos de conexión es compensada mediante un banco de capacitores común. La potencia reactiva del condensador correspondiente, necesaria para contrarrestar el consumo de potencia reactiva, se conecta o desconecta automáticamente con un dispositivo de regulación.

### **Compensación individual.**

La compensación individual es el tipo de compensación más efectivo. El condensador puede colocarse directamente junto a la carga, de esta manera, la mayor parte de la corriente reactiva fluye a través de los conductores existentes entre el condensador y la carga.

Sin embargo, la compensación individual puede influir negativamente, bajo ciertas condiciones, en el comportamiento de la carga a compensar. La potencia reactiva del condensador no debería ser muy alta, pues en caso contrario puede darse una sobrecompensación, por ejemplo, un incremento de la tensión, con efectos perjudiciales. Este es el motivo, por el que el condensador debe contrarrestar únicamente la potencia reactiva, que la carga necesita en situaciones sin carga.

### **Compensación en grupo.**

En instalaciones con un gran número de cargas compensadas individualmente puede ocurrir que se averíe un condensador. Este hecho se advierte casi siempre al presentar la siguiente cuenta de energía un incremento en el consumo de potencia reactiva.

El encontrar los condensadores averiados puede resultar una tarea larga y costosa. Por esta razón, en grandes instalaciones de iluminación, resulta ventajoso compensar

varias cargas mediante un condensador común. Este tipo de compensación se denomina compensación en grupo.

Esta solución representa un compromiso desde el punto de vista técnico; en la práctica resulta ser de las más usadas; ya que permite equilibrar las exigencias económicas, con una utilización discreta de las instalaciones.

Prácticamente el número de centros de corrección del factor de potencia, y la potencia de cada grupo, sobre los que actúan los condensadores; son objeto de un estudio, instalación por instalación. Los bancos de condensadores, se pueden instalar en los mismos tableros por ejemplo, en los centros de control de motores

Hay que conectar conjuntamente las cargas y el condensador para evitar la sobrecompensación. La potencia reactiva del condensador requerible se obtiene a partir de la suma de cada una de las potencias individuales

### **Compensación central.**

En instalaciones con un gran número de cargas de potencias distintas y con diferentes periodos de conexión, la compensación individual resulta muy costosa, la compensación en grupo sólo resulta posible bajo ciertas condiciones.

En estos casos la compensación central es la que ofrece más ventajas. Se coloca una batería de condensadores común en un lugar central, por ejemplo en el interruptor general de baja tensión. La correspondiente potencia reactiva capacitiva necesaria para el funcionamiento se conecta y desconecta escalonadamente de manera automática con un dispositivo regulador. El factor de potencia de la instalación puede mantenerse prácticamente constante de esta manera, independientemente de las variaciones en el valor de la potencia reactiva necesaria.

El banco de condensadores y el dispositivo regulador se denominan conjuntamente dispositivo regulador de potencia reactiva. Los conductores entre la instalación reguladora

y las cargas transportan potencia aparente, es decir, en los conductores propios de una empresa sigue existiendo potencia reactiva al existir compensación central.

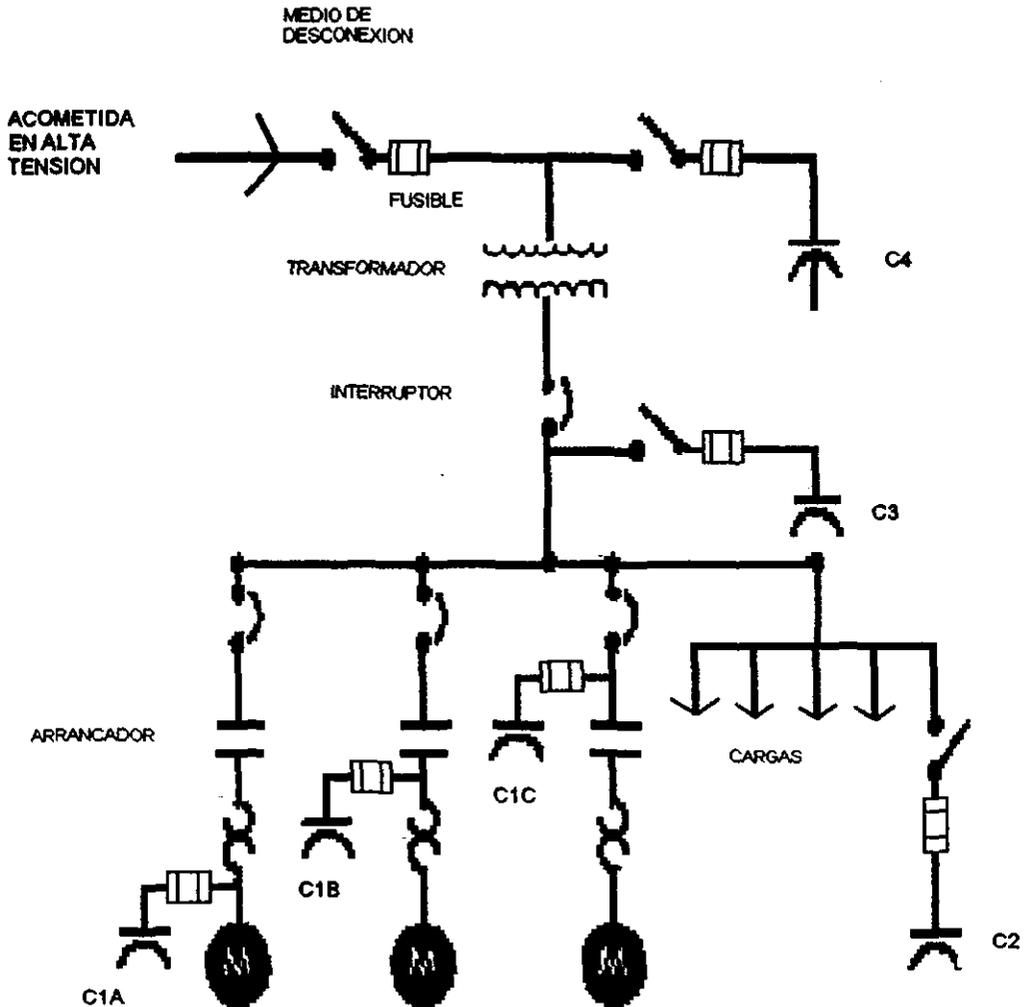


DIAGRAMA DE UNA INSTALACION ELECTRICA EN DONDE SE MUESTRA LA LOCALIZACION DE CAPACITORES PARA CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA

Fig. 3-7.

### 3.6 BANCOS DE CAPACITORES.

Los bancos de capacitores están constituidos por grupos de capacitores, los cuales dependiendo del nivel de tensión y de potencia requerida se conectan en serie o en paralelo. Las unidades en serie proporcionan el nivel de tensión mientras que las unidades en paralelo proporcionan la potencia.

A continuación se darán algunos casos para ejemplificar este concepto.

1. Con unidades de 3.33 KVAR para un sistema eléctrico a 220 volts.

A) Formar un banco trifasico de 10 KVAR para un sistema eléctrico a 220v entre fases.

En este caso, la conexión delta es la adecuada; teniendo el siguiente circuito:

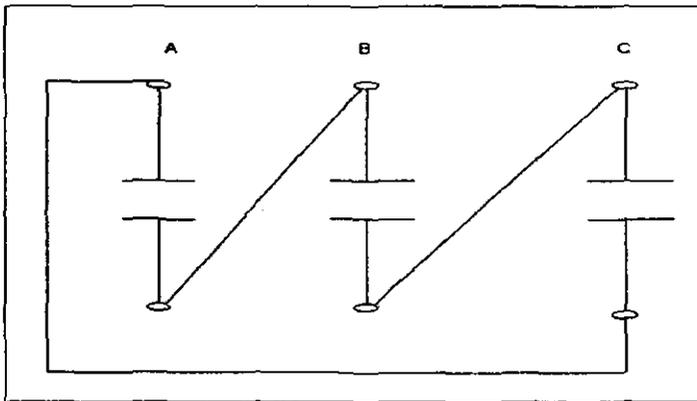


Fig. 3-8. Banco de capacitores trifasico de 10 KVAR.

B) Formar un banco de 20 KVAR para un sistema eléctrico a 400 volts entre fases.

La solución se presenta conectando el banco de capacitores en estrella de la siguiente manera.

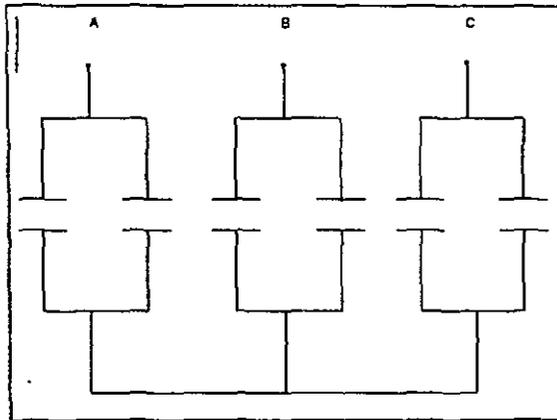


Fig. 3-9. Banco de capacitores trifasico de 20 KVAR.

2.-Ahora, teniendo capacitores de 1.66 KVAR a 440 volts entre fases:

A) Formar un banco de 10 KVAR a 440 volts.

La solución se da por medio de un banco de capacitores conectado en delta; con dos unidades en paralelo por rama.

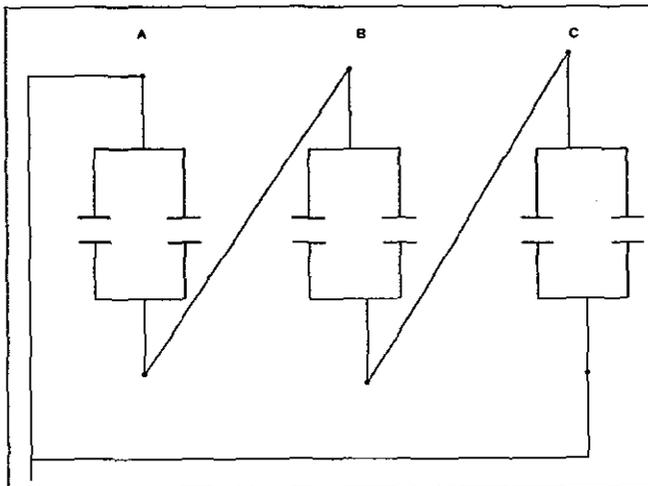


Fig. 3-10. Banco de capacitores trifasico de 10 KVAR.

B) Formar un banco de 60 KVAR para un sistema de 2400 volts entre fases:

La conexión mas apropiada es la estrella, por lo que se tiene:

$$V_L = 2400 \text{ volts entre fases}$$

$$\text{Tensión de fase} = V_f = V_L / 1.732 = 1385 \text{ volts.}$$

Como cada capacitor tiene una tensión nominal de 440 volts, se requieren 4 grupos en serie para tener el nivel de tensión deseado. A continuación se da la conexión propuesta para la solución.

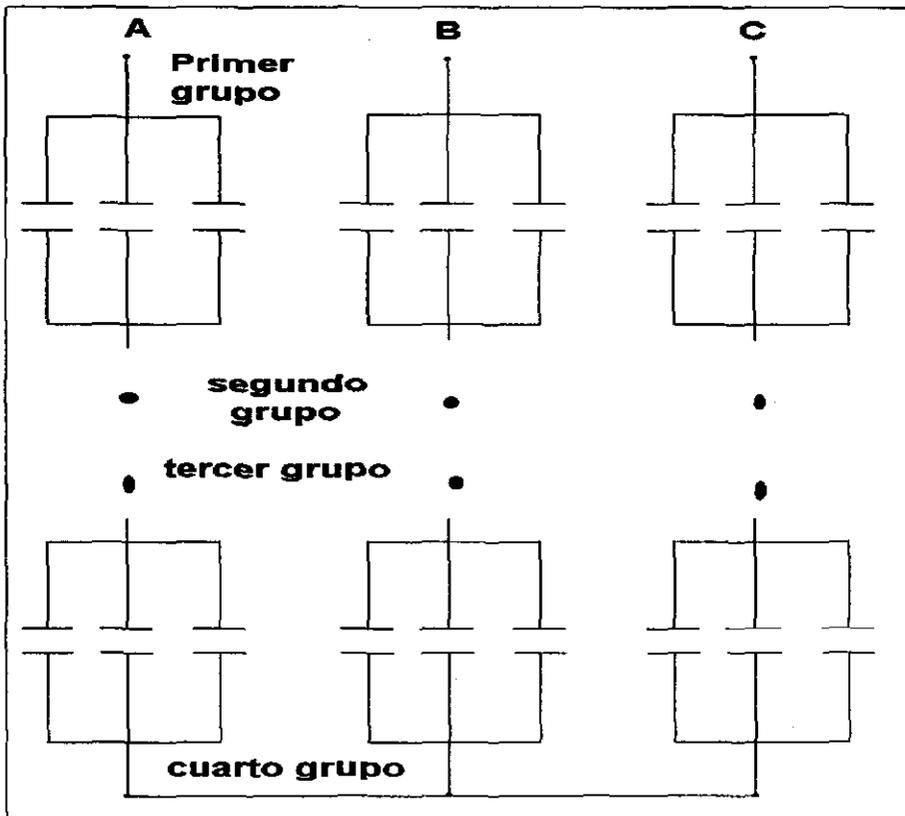


Fig. 3-11. Banco de capacitores trifasico de 60 KVAR.

### **Tipos de bancos de capacitores.**

A grandes rasgos, los bancos de capacitores se pueden clasificar en dos grandes grupos, dependiendo de si estos se conectan al sistema en forma fija o no.

#### **Bancos fijos.**

Se denomina banco de capacitores fijos aquellos que quedan conectados permanentemente a la línea y para los cuales no se prevén más que algunas operaciones de desconexión y conexión al año. Normalmente, se conectan a través de cuchillas desconectadoras o cuchillas cortacircuitos fusibles.

Los bancos se instalan, principalmente, bajo las circunstancias siguientes:

- Cuando la demanda de potencia reactiva de la carga que se pretende compensar es poco variable.
- Cuando se pretende reducir pérdidas por efecto joule, o bien; aumentar la capacidad de carga de transformadores, contándose con una carga global poco variable.
- Cuando se trata de elevar los niveles de voltaje en las líneas de distribución o circuitos secundarios.

#### **Bancos desconectables.**

Se denomina banco de capacitores desconectables aquellos que están planeados para entrar o salir de operación frecuentemente, ya sea de forma automática o manual. Normalmente se operan por medio de desconectadores diseñados especialmente para operar con cargas capacitivas puras. En algunas ocasiones también se operan por medio de interruptores.

Los bancos desconectables se instalan, principalmente, bajo las siguientes circunstancias:

Cuando se pretende compensar cargas fuertemente variables, ya sea con la finalidad de corregir el factor de potencia, reducir pérdidas eléctricas, o aumentar la capacidad de carga del sistema.

Cuando se trata de mejorar la regulación de voltaje en líneas de distribución y circuitos secundarios.

La razón primordial del uso de bancos de capacitores desconectables es la de optimizar la calidad y la economía de la distribución y el consumo de la energía eléctrica, avanzando un paso más en las mejoras que pueden lograrse en un sistema eléctrico al instalar bancos de capacitores fijos.

### **Bancos automáticos.**

La conexión automática de los capacitores se usa en las plantas industriales por las siguientes razones:

Para evitar sobrevoltajes en condiciones de carga ligera. Los capacitores en paralelo elevan el nivel de voltaje en la misma cantidad independientemente de que operen con una carga ligera o a plena carga. Por esta razón, la capacitancia necesaria para mejorar el factor de potencia al nivel deseado a plena carga puede ocasionar un sobrevoltaje a carga ligera.

Un ejemplo ilustra esto, supóngase que a un voltaje generado de 2400 volts, el voltaje a carga ligera en la barra conductora utilizada es de 2360 volts. Supóngase también que el voltaje de la barra conductora a plena carga es de sólo 2140 volts y que se instalen capacitores para mejorar el factor de potencia, elevándose el voltaje en la barra a 2300 volts como efecto secundario. Si los capacitores permanecen conectados a la carga ligera, el voltaje será:  $2360 + (2300 - 2140) = 2520$  volts. El sobrevoltaje es de 5 por ciento, y es recomendable desconectar los capacitores para evitar sobrevoltajes en los equipos sensibles al voltaje.

El voltaje puede regularse mediante la conexión por etapas de los capacitores en paralelo, de acuerdo con los cambios de voltaje en la barra de carga. Esta clase de regulación de voltaje no es suficientemente uniforme, ya que mientras más cortas son las etapas, el procedimiento es más costoso.

Para evitar sanciones impuestas por la compañía de suministro debido a un factor de potencia de adelanto. Estas sanciones no se imponen con frecuencia, y cuando lo son las compañías de suministro permiten factores de potencia de adelanto muy bajos. Ocasionalmente se aplican sanciones por factor de potencia de adelanto, para hacer consciente al usuario de las pérdidas que ocasionan en las líneas de suministro, así como de la inestabilidad del sistema de generación que alimenta sistemas con altos factores de potencia de adelanto.

Para reducir las pérdidas del sistema a cargas ligeras. A plena carga, los capacitores alimentan los KVAr necesarios a la barra colectora. A cargas ligeras, los capacitores alimentan Kvar de retorno al sistema de suministro, y ese flujo innecesario de corriente reactiva incrementa las pérdidas. Estas pérdidas se pueden eliminar mediante la desconexión automática de los capacitores durante la operación con cargas ligeras.

Para evitar la inestabilidad de los generadores. A los generadores que operan con un factor de potencia de adelanto, se les debe reducir su excitación. Como consecuencia, los generadores se vuelven inestables, y un generador inestable tiene la tendencia a perder su paso cuando se producen oscilaciones transitorias de energía. Las características generales del generador y su sistema de excitación determinan cuánto puede adelantarse el factor de potencia antes de que ocurra una inestabilidad. Cuando la inestabilidad es resultado de la cantidad de capacitores existentes en el sistema, se deben instalar dispositivos para desconectar todos o parte de los capacitores.

Para impedir la sobrecarga del circuito. Un circuito sobrecargado que opera con un factor de potencia bajo, conduce corriente reactiva que sobrecarga el circuito, pero no produce potencia útil. Cuando se conectan los capacitores, inmediatamente se mejora el factor de potencia de la carga y se elimina la corriente reactiva en el circuito. El efecto resultante es la reducción de la carga del circuito. Para evitar la presencia de la corriente de los capacitores en el circuito con cargas ligeras, aquellos se pueden desconectar automáticamente, y así reducir las pérdidas y los sobrevoltajes.

Los controles más comunes para la conexión automática de los capacitores en las plantas industriales son los de tiempo sensibles al voltaje, sensibles a la corriente, sensibles a los KVAr. Y de compensación de voltaje y de corriente. El control recibe la

señal, la interpreta e inicia la conexión o desconexión de los capacitores. El control estándar de conexión contiene un elemento maestro que puede ser sensible a voltaje, corriente, tiempo o KVAR.

Se usa un dispositivo de retardo para evitar la operación innecesaria por cambios momentáneos de la señal. Sólo en el caso de controles de pasos múltiples es necesario un dispositivo de secuencia, el cual determina el orden en que los capacitores se deben conectar y desconectar. Generalmente, este dispositivo es un conmutador selector operado con motor.

Además de los dispositivos básicos de control, otros componentes varios pueden ser deseables en el sistema de control. Estos pueden ser relevadores auxiliares, conmutadores automáticos o manuales de transferencia, conmutadores de cierre y disparo y otros semejantes. El número y tipo de dispositivos adicionales depende del refinamiento y flexibilidad deseados.

El tipo de información usada para una aplicación específica, depende del costo, localización del banco de capacitores, el número de pasos de conexión, los ciclos cotidianos de carga y el objetivo de la aplicación del capacitor.

Los tipos de control más frecuentemente usados para la conexión de los capacitores existentes son: los controles de tiempo para los bancos instalados en postes y los controles de voltaje para los bancos de las subestaciones de distribución.

El control de tiempo es el tipo más común de control que se usa en los bancos de capacitores conectados a sistemas de distribución.

Este control conecta el banco de capacitores después de un cierto retardo, y lo desconecta después de un lapso preestablecido. Se usa frecuentemente con bancos de una sola etapa, de 150 a 600 kvar, localizados en alimentadores primarios, cuando se conoce el ciclo cotidiano de carga, la carga permanece razonablemente constante por largos periodos y tiene un patrón de carga que se repite sobre un período de tiempo. La mayor ventaja del control de tiempo es su bajo costo y el hecho de que no es necesaria su coordinación con otro equipo de regulación de voltaje.

Una desventaja del control de tiempo, es que su secuencia de operación es la misma tanto en condiciones de carga normal como de cargas anormales. Si ocurre una falla de energía en un alimentador, y una parte de este está conectada temporalmente a otro alimentador adyacente del sistema, el capacitor debe estar incluido en el circuito, para mantener los niveles adecuados de voltaje con la carga adicional. Si ocurre una falla cuando los capacitores normalmente no están conectados al circuito, se deben conectar mediante un circuito especial.

El control de voltaje solo, se puede usar como una fuente de información, solamente cuando los capacitores con interruptor se conectan en puntos donde el voltaje del circuito disminuye con un incremento de la carga del circuito. Si los capacitores se conectan en puntos donde el voltaje del circuito se incrementa con la carga, entonces debe usarse una segunda fuente de información. Los controles de voltaje y corriente y de tiempo y voltaje son dos de estas fuentes de información.

El control de voltaje, extensamente usado en las subestaciones, tiene la ventaja de iniciar una operación de conexión sólo cuando la condición del voltaje del circuito lo demanda y es independiente del ciclo de carga. La amplitud de banda del ajuste de voltaje depende de la capacidad nominal del banco de capacitores, el número de etapas, y de si se aplica otro equipo regulador de voltaje al mismo circuito. Siempre se hace uso de un tiempo de retardo antes de efectuar cualquier operación de conexión, para evitar conexiones innecesarias producidas por perturbaciones transitorias.

El control de corriente sola, se usa únicamente cuando el voltaje no es una señal satisfactoria. Los usos principales de este tipo de control son en alimentadores o subestaciones donde el voltaje aumenta con la carga o en donde la reducción de voltaje al aumentar la carga no es suficiente para regular la corriente eficazmente. Para obtener un control efectivo de la corriente, el cambio de carga debe ser tal, que la relación de la demanda máxima a la mínima sea de tres o mayor. Siempre se usa un tiempo de retardo al controlar la corriente, para evitar operaciones excesivas debidas a perturbaciones momentáneas de carga.

La conexión manual es el control de conexión menos costoso. Se usa normalmente en subestaciones controladas manualmente.

La forma común de corregir el factor de potencia es mediante bancos de capacitores fijos, los cuales entregan una potencia reactiva constante sin importar las variaciones de carga del sistema eléctrico.

Lo anterior puede provocar problemas de sobrecompensación y el consecuente sobrevoltaje en las líneas, y por lo tanto, en los equipos instalados, tales como transformadores, motores, balastros, equipos de cómputo etc. reduciendo con esto, su vida útil al envejecer paulatinamente los aislamientos y pudiendo ocasionar fallas.

Aunque las condiciones de operación de una instalación o planta sea constante, durante las horas de descanso, comida, cambio de turno, sábados y domingos, vacaciones, paros por mantenimiento, etc. existen variaciones fuertes de carga, que provocan sobrevoltajes y sobrecompensación si no se desconectan los capacitores. Así mismo, durante las interrupciones en el suministro de energía eléctrica por parte de la compañía suministradora por cortos periodos de tiempo, se presenta este fenómeno.

La solución óptima para la corrección del factor de potencia son los bancos automáticos, los cuales cuentan con elementos capaces de variar la potencia reactiva de acuerdo a las necesidades del circuito, manteniendo el factor de potencia constante en un valor preestablecido.

La sensibilidad con la que el regulador de VARs reaccionara, es determinada por el valor de ajuste  $c / k$ . Este valor depende de la potencia reactiva de cada paso, de la relación del transformador de corriente y del voltaje de operación.

El circuito de medición. Para que el regulador de vars opere correctamente, deberá alimentarse a éste con una señal de corriente y otra de voltaje.

La señal de corriente deberá tomarse de un transformador de corriente (tc), instalado para este fin, en la fase L1 ó A convenientemente polarizado. Es muy importante que dicho TC esté del lado fuente, es decir, antes de los capacitores y de la carga.

Entre la conexión de cada uno de los pasos existe una diferencia de tiempo de 40 seg. Con el objeto de que se descarguen los capacitores. El regulador de vars está equipado además con una función de verificación de no-voltaje; la cual desconecta todos los capacitores en caso de pérdida de energía e introduce un retardo de tiempo de 2 min. Antes de conectar cualquier paso, una vez que se restablece el suministro de energía.

Dependiendo de las necesidades de compensación y del modelo de regulador de vars utilizado, un banco automático puede estar formado por 3, 5, 6, 7, 13, o 23 pasos. A continuación se da el diagrama de un banco automático de 3 pasos.

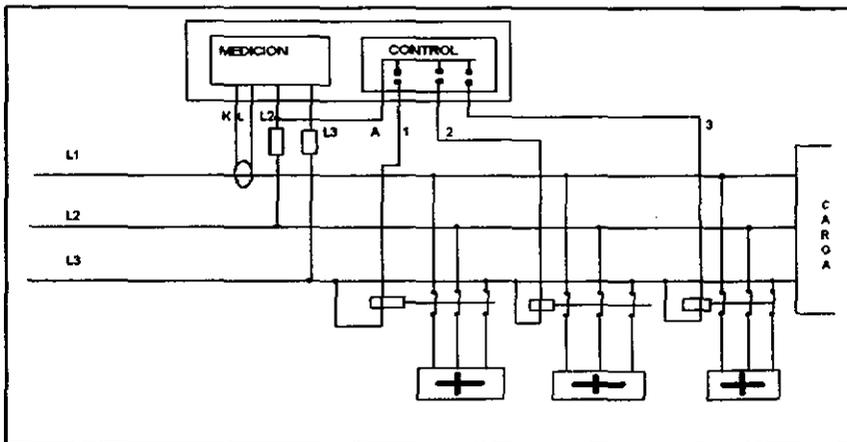


Fig. 3-12. Diagrama de alambado para un banco automático de 3 pasos.

### El ajuste de sensibilidad C / K.

En general los bancos automáticos de capacitores son sensibles a cambios de 2/3 el valor de la potencia de un paso, es decir, cuando el regulador de vars detecte que se requieren por lo menos 2/3 del valor de potencia reactiva de un paso, este conectara el paso o los pasos necesarios para alcanzar el factor de potencia preajustado y viceversa. Para lograr esto, el regulador de vars deberá ser ajustado a un valor sensibilidad C / K de acuerdo con la siguiente formula de circuitos trifasicos.

$$C / K = \frac{360 \times Q}{V \times RTC} \quad (94)$$

Donde :

C / K = Ajuste de sensibilidad.

Q = Potencia reactiva ( KVAR ) del paso.

V = Voltaje del sistema.

RTC = Relación del transformador de corriente utilizado para la medición.

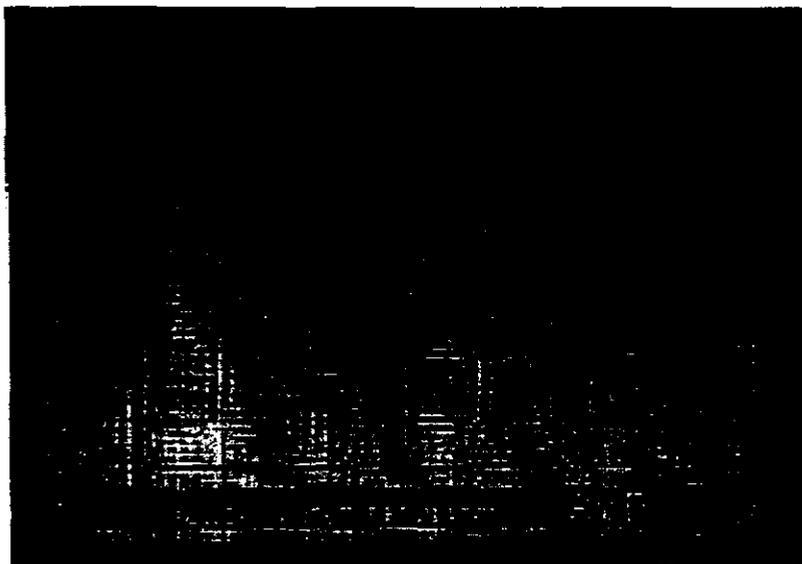
### COMPONENTES

Básicamente, un banco automático para la regulación del factor de potencia está formado por los siguientes elementos:

1. Regulador automático de vars. El cual tiene cinco funciones:
  - Determinar el factor de potencia deseado para lo cual mide la potencia reactiva necesaria y controla la conmutación de los diferentes pasos de capacitores, de acuerdo al factor de potencia deseado.
  - Medición del factor de potencia (CosΦ ). Para lo que sensa los valores de corriente y voltaje y realiza la medición por el método de integración.
  - Ajuste del CosΦ deseado. Esto se realiza por medio de un control, colocando en la carátula del regulador y graduado en valores de CosΦ (0.7 inductivo a 0.95 capacitivo).

- Ajuste de sensibilidad C/K. Esto se efectúa con un control igualmente colocado en la carátula y es para darle al regulador la sensibilidad, de acuerdo al TC y los valores de potencia reactiva de cada paso. Es decir se le indica cuando debe iniciar a conectar pasos y cuando conecta y desconecta un paso.
- Cuenta con un indicador de factor de potencia digital

Prácticamente, el regulador reacciona a cambios de  $2/3$  el valor de corriente del paso. El tiempo entre la conexión de cada paso es de aproximadamente 40 segundos. Por lo tanto no hay problemas en los transitorios de voltaje.



**Fig. 3-13. Carátula del regulador automático de VARS.**

2. Interruptor termomagnético general de la capacidad adecuada. Cuya función es proteger de manera general todo el banco automático.

3. Contactores.

- Los cuales son controlados por el regulador de vars y su propósito es conectar y desconectar los pasos de capacitores.
- Mecánicamente: para tener una gran cantidad de operaciones. Eléctricamente: para resistir la corriente transitoria de conexión.

4. Fusibles.

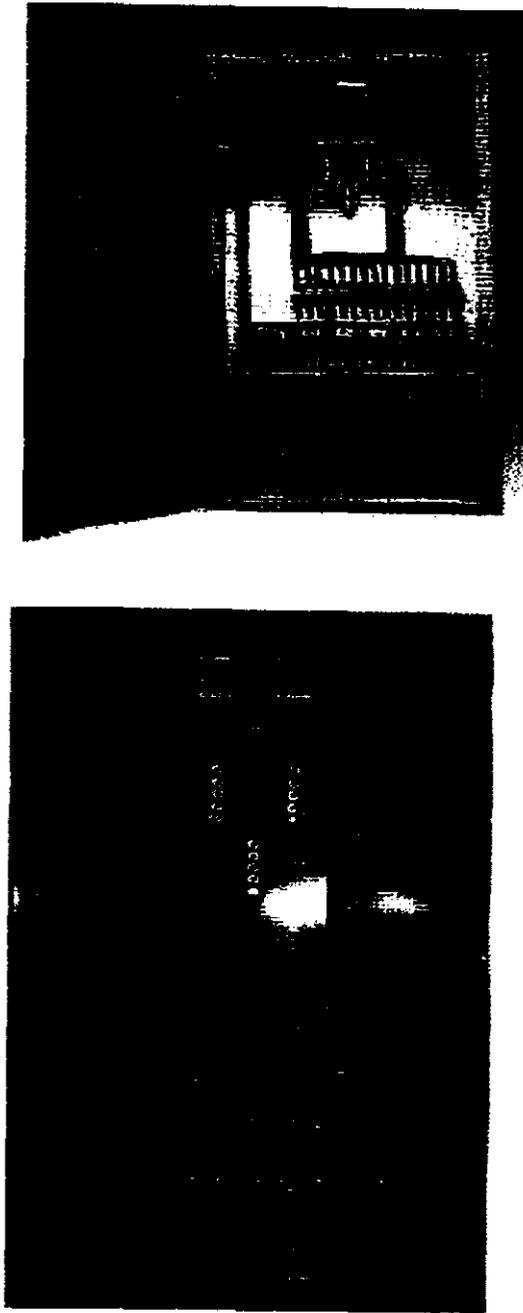
- Su función es la de proteger a cada capacitor, independientemente de la protección que les brinda el interruptor general.

5. Un banco de capacitores.

Formado por 5 unidades, (para el caso más común del banco automático de 5 pasos). Cada capacitor cuenta con resistencias, las que lo descargan cuando éste se desconecta, a un valor de 50 volts en aproximadamente un minuto.



Fig. 3-14. Banco de capacitores de 3 módulos.



**Fig. 3-15. Conexiones de un banco de capacitores.**

### 3.7 PROTECCION DE LOS BANCOS DE CAPACITORES.

Los capacitores, como cualquier otro equipo eléctrico, y en especial si se toma en cuenta, que es un dispositivo cuyo aislamiento no puede ser muy grueso, cuya superficie expuesta a falla es muy grande. La posibilidad de estas fallas hace imprescindible que en cualquier instalación de capacitores de potencia, ya sea en alta o baja tensión se planee una protección adecuada.

La protección de los bancos de capacitores esta íntimamente ligada con el arreglo y conexión de los mismos. Los arreglos más usados son: a) una sola fila de capacitores en paralelo por fase, y b) varias filas de capacitores conectados en serie por fase. La conexión de los bancos puede ser en delta o en estrella; si es en estrella, la conexión puede ser con el neutro conectado a tierra o flotante

Cuando se utiliza el primer arreglo descrito para la conexión en delta, la falla de una unidad significa un corto circuito entre fases; para la conexión en estrella con neutro a tierra la falla de un elemento del banco viene a ser la falla de una fase a tierra; pero cuando el neutro está flotante la corriente por la falla de una unidad de una fase es igual a tres veces la corriente nominal de dicha fase.

Para el segundo arreglo, la corriente de corto circuito por la falla de un capacitor en una de las filas esta limitada por la impedancia de las otras filas restantes y no varia de una forma tan significativa con el tipo de conexión efectuada.

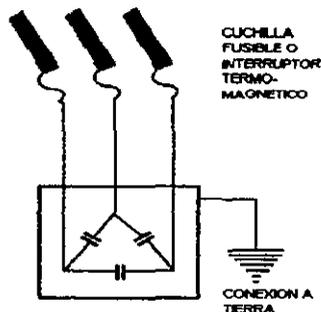


DIAGRAMA DE CONEXION DE UN CAPACITOR

Fig. 3-16.

POTENCIA KVAR	AMPERS		PROTECCION		CALIBRE	
	240 V	220V	FUSIBLE	TERMOMA	FASES(3)	TIERRA(4)
5	12	11	30	20	3-10	1-12
7	17	15	30	30	3-10	1-12
10	24	22	60	40	3-8	1-10
15	36	33	60	50	3-4	1-10
20	48	44	100	70	3-3	1-8
25	60	55	100	100	3-2	1-8
30	72	66	200	100	3-1	1-6
40	96	88	200	150	3-2/0	1-6
50	120	110	200	175	3-4/0	1-6
60	144	132	250	200	3-250	1-6
	480 V	440V				
10	12	11	30	20	3-10	1-12
14	17	15	30	30	3-8	1-12
20	24	22	60	40	3-8	1-12
25	30	28	60	50	3-6	1-10
30	36	33	60	50	3-4	1-10
40	48	44	100	70	3-3	1-8
50	60	55	100	100	3-2	1-8
60	72	66	200	100	3-1	1-6
70	84	77	200	125	3-1/0	1-6
80	96	88	200	150	3-2/0	1-6

Tabla 3-2. Calibre del conductor y capacidad de protecciones.

### **Protección por fusibles.**

La protección por medio de fusibles es la mas usada para bancos de capacitores y pueden aplicarse a fin de proteger unidades individuales o unidades en grupo. A pesar de que la protección individual de capacitores tiene las ventajas de ser más selectiva, de permitir usar fusibles más pequeños y de indicar directamente la unidad fallada, presenta inconvenientes. En el caso de un banco conectado en estrella con neutro flotante, la falla y desconexión de algunas unidades en alguna de las fases origina un desplazamiento eléctrico del neutro que, a su vez ocasiona una sobretensión en los capacitores de la fase o de las fases que hayan quedado con mayor impedancia. En casos de bancos conectados en estrella con neutro a tierra, o en delta, cuyas fases estén formadas por varias filas de capacitores conectados en serie entre sí, (conexión serie-paralelo) la falla y desconexión de algunas unidades de las filas puede originar una redistribución de la tensión aplicada en dichas filas.

El capacitor es un elemento muy sensible a los excesos de tensión, tanto que un sobrevoltaje del 10% de la tensión nominal lo puede hacer fallar. La salida de cierto número de unidades pone en peligro a los restantes por exceso de tensión, a no ser que el banco de capacitores tenga el tamaño suficiente para que el desbalance de tensión, producido por la salida de unos pocos capacitores no resulte significativo.

Las prácticas básicas de aplicación de fusibles que actualmente se emplean consisten en el empleo de los dispositivos de expulsión; donde la corriente de corto circuito es alta, se utilizan con fusibles limitadores de corriente. Cuando se selecciona un fusible para proteger un banco de condensadores, se debe considerar: la corriente de carga, la corriente de puesta en servicio, la energía de ruptura del tanque, la corriente de corto circuito que se tiene en el lugar de su instalación y el tipo de conexión.

En la actualidad aplicar fusibles para proteger unidades en grupo es la técnica de protección predominante. Sin embargo, dado el gran número de fallas y de fracturas en los bancos de capacitores protegidos en grupo que se han presentado, esta protección tiende a desecharse y la aplicación de fusibles individuales está recibiendo más atención. El mayor beneficio de aplicar fusibles para proteger unidades en grupo es que se presenta como la forma más económica de proteger bancos de capacitores. Sin embargo

cuando las fases están compuestas de muchas unidades los fusibles en grupo no pueden proporcionar la sensibilidad necesaria para detectar fallas de alta impedancia.

Además, los fusibles para unidades individuales proporcionan mayor sensibilidad para detectar incrementos de corriente en una unidad fallada; pero cuando un fusible opera, permite que los otros capacitores en paralelo se sobretensionen, hasta que se repara la unidad fallada.

### **Protección con relevadores.**

Los bancos de capacitores de gran capacidad normalmente se protegen con fusibles individuales y con relevadores. Esta forma de protección se apega a la filosofía general de la protección, la cual señala que un equipo debe quedar fuera del sistema eléctrico lo más rápidamente posible una vez que se produce una falla en una parte de él.

Una forma de proteger un banco de capacitores es colocando un fusible en cada unidad. En este caso, el fusible individual detecta e indica que una unidad ha fallado, aislándola del resto del banco lo suficientemente rápido para prevenir la ruptura del tanque y un daño a las unidades adyacentes, permitiendo a la vez que el resto de las unidades del banco permanezcan en servicio. Sin embargo, cuando un fusible aísla una unidad fallada, se presenta un incremento de tensión en las unidades restantes como ya fue asentado; por lo tanto, para evitar daño por sobretensiones, se acostumbra proteger, además, los bancos con relevadores, que deben proporcionar la señal de disparo al equipo de desconexión del banco, cuando el exceso de tensión se acerque a valores peligrosos.

Los relevadores que protegen bancos de capacitores se conocen como relevadores de desbalance, debido a que detectan la falla del aislamiento de una unidad y cuya operación del fusible ha dejado un desbalance en el banco. En general, un relevador de desbalance debe:

1. Coordinarse adecuadamente con los fusibles, de manera que al operar estos, proporcionen un medio visual para localizar las unidades defectuosas.
2. Tener la suficiente sensibilidad como para accionar una alarma cuando se produzca la pérdida de un capacitor, y ordenar el disparo del equipo de protección cuando quede fuera de servicio un número de unidades tal, que causen una condición de sobretensión en exceso de 10% de la tensión nominal.
3. Tener un tiempo de respuesta tan corto que sea mínimo el daño debido a una falla de arco interno y evitar falsas operaciones debido a corrientes de puesta en servicio, corrientes por descargas atmosféricas, por apertura o cierre de equipo cercano o porque los contactos del equipo de seccionamiento no abran simultáneamente.
4. Estar protegido contra tensiones transitorias que aparezcan en el alambrado de control.
5. Incluir un filtro para minimizar el efecto de las armónicas.
6. Tener un dispositivo de apertura definitiva que impida la conexión automática del banco de capacitores después de que se detecta una falla en él.
7. Proporcionar un medio de compensación que niegue el efecto del desbalance de las tensiones del sistema o el desbalance propio de las unidades por variaciones en la fabricación (rangos del relevador).



**Fig.3-17. Contactores y relevadores térmicos.**

### **Interruptores Termomagneticos**

Los interruptores están diseñados para abrir el circuito en forma automática cuando ocurre una sobrecarga accionado por una combinación de un elemento térmico y un elemento magnético.

El elemento térmico consta esencialmente de la unión de dos elementos metálicos de diferentes coeficientes de dilatación, conocido también como par térmico, el cual al paso de la corriente se calienta y por lo tanto se deforma, habiendo un cambio de posición que es aprovechado para accionar el mecanismo de disparo del interruptor.

El elemento magnético consta de una bobina cuyo núcleo es movable y que puede operar o disparar el mecanismo del interruptor, el circuito se abre en forma instantánea cuando ocurre una sobrecorriente, operan con sobrecargas con elemento térmico y por sobrecorrientes con el elemento magnético para fallas.

Desde el punto de vista de su utilización los interruptores termomagnéticos resultan más convenientes que los fusibles, ya que un interruptor termomagnético se puede cerrar con facilidad sin ningún riesgo después de que ha disparado. Por el contrario un fusible que se ha fundido se debe cambiar por otro elemento.

Por otra parte, cuando se funden los fusibles, se debe disponer de los fusibles de repuesto. Cuando no se tienen estos, se puede caer en la tentación de puentear el fusible o bien sustituirlo por otro de mayor capacidad, en cuyo caso se crean condiciones de riesgo en la instalación.

Por experiencia se sabe que el uso de fusibles es confiable y normalmente no requieren de ser cambiados por periodos largos de tiempo, por otra parte, también se observa de la experiencia que los interruptores termomagnéticos se ven más afectados por las condiciones ambientales y pueden llegar a ser un poco menos precisos en su operación, por lo que se recomienda que su mecanismo de operación se revise por lo menos una vez por año, lo cual no siempre ocurre, ya que por lo general se observan sólo después de haber disparado, cuando por alguna razón el mecanismo de operación se encuentra oxidado o en mal estado, puede ocurrir que no opere y entonces un circuito puede permanecer cerrado en condiciones de falla, lo cual representa un riesgo para la instalación eléctrica, esta situación no se presenta con los fusibles, lo cual representa una ventaja de estos.

Un problema que se puede presentar con el uso de fusibles, es que los circuitos trifásicos se puedan ver sometidos a una falla denominada pérdida de fase, lo cual dependiendo del diseño puede representar una desventaja con respecto a los interruptores termomagnéticos. Una falla en cualquiera de las fases de un circuito trifásico que está protegido por interruptores termomagnéticos, produce la apertura de todas las fases del circuito, cortando la alimentación a la carga trifásica.

De hecho un interruptor termomagnético combina la función de una cuchilla desconectadora con protección del circuito, en cambio un fusible necesita de un switch adicional para cumplir con la misma función, aún con esto un fusible es más barato que el interruptor termomagnético.

La tendencia general es usar los interruptores termomagnéticos en la mayoría de los casos de instalaciones industriales.



Fig. 3-18 interruptores termomagnéticos.

### 3.8 OPERACIÓN DE LOS CAPACITORES

Las instrucciones del fabricante deben estudiarse con todo cuidado y se deben de seguir exactamente, con objeto de obtener los mejores resultados. Es imposible cubrir en detalle todas las reglas para la instalación de cada uno de los tipos diferentes de capacitores que se fabrican, sin embargo, la información que sigue cubre los puntos más importantes a observar.

La vida de un capacitor se afecta por sobre esfuerzos, sobrecalentamiento, por variaciones químicas o daños físicos de sus componentes por cambios frecuentes de temperatura. Por lo tanto, la vida del capacitor depende del control de las condiciones de operación, que involucren tensiones, variaciones de temperatura y de su mantenimiento.

Si el circuito en el que se pretenda conectar un banco de capacitores esta sujeto a variaciones anormales de tensión, la tensión nominal del capacitor debe ser por lo menos igual al 95% de la tensión más alta del circuito.

Los capacitores causan un aumento de tensión en el punto del sistema donde se instalan y su tensión de trabajo aplicada se incrementa. Por lo tanto, es más probable que los capacitores operen a sobretensiones que otros equipos, ya que estos normalmente causan una caída de tensión, en su punto de instalación. En consideración de lo anterior, la tensión nominal y la sobretensión permisible de operación, son mayores que aquellas establecidas para la mayoría de otros equipos.

Se ha establecido en la NOM-J-203 que los capacitores pueden operar con 10% de sobretensión con la limitación que no sobrepase su potencia reactiva máxima permisible. Si se excede el límite de 10% de sobretensión, se debe reducir la tensión del circuito, o se deben desconectar los capacitores durante los periodos de sobretensión, o bien se deben instalar capacitores de mayor tensión nominal.

La operación continua a tensiones y temperaturas cuyos valores sean cercanos a los límites superiores respectivos, reduce considerablemente la vida de los capacitores.

## CAPITULO CUATRO

### CONTROL DE ARMONICAS EN SISTEMAS ELECTRICOS INDUSTRIALES

#### 4.1 DEFINICION DE ARMONICAS.

En un sistema ideal de potencia, el voltaje suministrado y la corriente de carga son dos señales senoidales perfectas. En la práctica, sin embargo, las condiciones nunca son ideales, por lo que existen algunas formas de onda que presentan distorsiones esta deformación de la señal senoidal perfecta usualmente suele expresarse en términos de distorsión armónica de las señales de voltaje y corriente.

En los sistemas de potencia la distorsión armónica no es un fenómeno nuevo, ya que los esfuerzos por mantener dicho efecto dentro de valores aceptables han aparecido desde los inicios de los sistemas eléctricos de potencia. En esos tiempos la distorsión fue causada por la saturación magnética de los transformadores o por ciertas cargas de tipo industrial, tales como hornos eléctricos o soldadoras. Los mayores efectos que producen las armónicas, se presentan en las máquinas sincronas y en las de inducción, en los teléfonos provocando interferencia y dañando los capacitores de potencia de cualquier sistema eléctrico. En el pasado, los problemas con las armónicas se encontraban, frecuentemente dentro de cierta tolerancia, debido a que el equipo era diseñado conservadoramente con grandes márgenes de diseño y además se tenía a los transformadores conectados en estrella aterrizada-delta, conexión que servía para confinar algunas de las armónicas.

Ahora sin embargo, en los modernos sistemas eléctricos de potencia las armónicas acompañan con mucha frecuencia a la utilización de la energía eléctrica, principalmente porque han aumentado enormemente las cargas no lineales que producen armónicas. el más importante de estos mecanismos no lineales es el convertidor estático de potencia, utilizado en controladores de velocidad, periféricos de computadoras, controles de equipo de computo, vías de tren electrificadas, utensilios de consumo, etc.

La utilización de bancos de capacitores en los sistemas eléctricos para la corrección del factor de potencia puede crear condiciones de resonancia cuando existen armónicas en el mismo sistema. Estas armónicas producen corrientes con frecuencias altas que dan por resultado que la reactancia capacitiva disminuya y que la reactancia inductiva del sistema se incremente.

Esto da por resultado un circuito RLC que puede hacerse resonante a determinadas frecuencias. Al presentarse una resonancia se crean oscilaciones entre voltaje de línea y voltajes armónicos que en conjunto se suman y crean un voltaje distorsionado creciente en amplitud, que puede llegar a dañar el banco de capacitores. Estos voltajes altos provocan esfuerzos dieléctricos en el capacitor ocasionando fallas en el mismo.

El término de armónicas se originó en el campo de la acústica, en donde se refiere a la vibración de una señal a una frecuencia que es múltiplo de la frecuencia básica o fundamental. En las señales eléctricas, las armónicas son voltajes y corrientes, con frecuencias que son múltiplos de la frecuencia fundamental que la acompañan. A estos múltiplos de la frecuencia fundamental (en México es de 60 hz) se les determina como orden de las armónicas, por lo que se tiene armónicas de 3° (180 Hz), 7° (420 Hz), 9° (540 Hz) etc.

$$\text{Frecuencia armónica} = n \times 60 \text{ Hz}$$

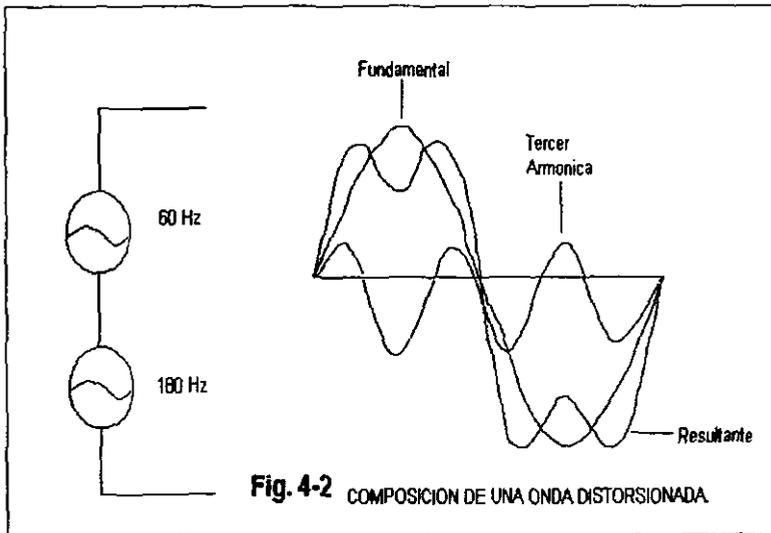
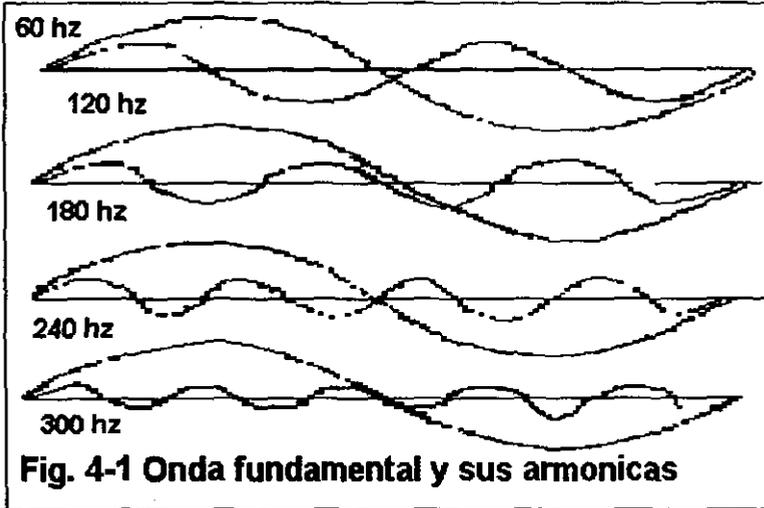
Donde n es el orden de armónica (un número entero).

La relación de fase de la armónica con respecto a la frecuencia fundamental es significativa en la determinación de la forma de onda resultante. En las señales eléctricas la fase relativa de la armónica puede alterar el efecto global en forma considerable.

La figura 4.1 ilustra la onda senoidal de frecuencia fundamental 60 hz y la 2°, 3°, 4° y 5° armónicas.

El fenómeno de la distorsión armónica no es nuevo, anteriormente la distorsión armónica era causada por la saturación magnética de los transformadores o por ciertas cargas industriales: hornos de inducción y soldadura de arco. En este caso lo que más

preocupaba era los efectos en las máquinas rotatorias, así como interferencia telefónica y daños a capacitores de potencia. La implantación de procedimientos para su control constituye una preocupación permanente de los ingenieros involucrados en las diversas etapas de la utilización de la energía eléctrica desde los primeros sistemas eléctricos.



## 4.2 FUENTES DE ARMÓNICAS.

Existe un gran número de dispositivos que producen distorsiones armónicas. En nuestros días, la distorsión armónica constituye un gran problema debido al uso de cargas no lineales. Algunas de éstas fuentes han existido desde la implantación de los sistemas de potencia. Otros han existido pero en números más pequeños durante muchos años atrás. Una vez más, el progreso tecnológico ha traído consigo una contaminación grave del medio eléctrico, por lo tanto es preciso aprender a controlarse a base de una técnica adecuada.

La clasificación de las fuentes principales que producen estos disturbios en la red de energía eléctrica son:

- a) Fuentes de armónicas tradicionales.
- b) Fuentes nuevas de armónicas.
- c) Fuentes futuras de armónicas.

### **Fuentes tradicionales de armónicas.**

Anteriormente, la propagación de armónicas se relacionaba con el diseño y la operación de transformadores y máquinas rotatorias; de hecho la primera fuente generadora de armónicas en esos días era la corriente de magnetización de los transformadores de potencia.

Los transformadores y máquinas rotatorias modernas trabajando en estado estable no provocan una distorsión significativa en la red eléctrica, pero cuando hay fluctuaciones de voltaje en la red y cuando operan fuera de sus especificaciones de rango, pueden aumentar su contenido armónico con niveles de distorsión considerables. Otras cargas que producen armónicas son la luz fluorescente y los hornos de arco.

### Transformadores.

En un núcleo ideal sin pérdidas por histéresis, el flujo magnético y la corriente de magnetización necesaria para producirlo están relacionadas entre sí mediante la curva de magnetización del acero utilizado en las laminaciones. Aún en esta condición la forma de onda resultante no es una senoidal pura.

Cuando hay pérdidas por histéresis, la forma de onda de la corriente no es simétrica con respecto a su valor máximo. La distorsión que se obtiene se debe a las armónicas triples (  $3^\circ$ ,  $9^\circ$ ,  $12^\circ$ , etc.), pero primordialmente a la tercera armónica, ya que para mantener una alimentación de voltaje senoidal es necesario proporcionar una trayectoria para estas armónicas triples, esto se logra generalmente con el uso de devanados conectados en delta.

Las armónicas debidas a la corriente de magnetización se incrementan a sus niveles máximos en las horas de la madrugada, cuando el sistema tiene muy poca carga y el nivel de voltaje es alto.

Al desactivar un transformador, puede que almacene flujo magnético residual en el núcleo. Cuando se restablezca la unidad, la densidad de flujo puede tomar niveles máximos de hasta tres veces el flujo en operación normal.

Esto puede causar en el transformador niveles extremos de saturación y producir amperes-vueltas excesivos en el núcleo. Este efecto da lugar a corrientes de magnetización de 5 a 10 veces de la corriente nominal, comparada con la corriente de magnetización nominal de apenas de 1% ó 2% de la corriente nominal.

La disminución de está corriente de energización con el tiempo es función principalmente de la resistencia del devanado primario. Para transformadores muy grandes, esta corriente puede permanecer por muchos segundos, debido a su baja resistencia.

### **Hornos de arco.**

Un horno de arco es una carga compleja, no únicamente por la fluctuación en el consumo de potencia reactiva, sino también porque la corriente del horno es altamente distorsionada.

El horno de arco, por ser una carga eléctrica de características no lineales, es una fuente de generación de corrientes armónicas en forma aleatoria, teniendo valores cercanos a la resonancia, debido a la respuesta en frecuencia de los bancos de capacitores con la reactancia propia de la línea de alimentación, ocasionando problemas de sobrevoltajes y sobrecorrientes, causando frecuentemente la operación de los fusibles de los bancos de capacitores, fallas en el equipo de medición etc.

### **Lámparas fluorescentes.**

La utilización en gran escala de las lámparas fluorescentes como medio para reducir el consumo de energía se ha visto recientemente incrementada en muchos lugares del mundo. La utilización de nuevas tecnologías que abarcan diseños de lámparas fluorescentes y lámparas de vapor de metal constituyen sistemas más eficientes de iluminación.

Sin embargo, es importante analizar el lado negativo del uso masivo de las lámparas fluorescentes. La preocupación reside en el deterioro que puede sufrir la calidad de la energía en las instalaciones eléctricas donde se aplica éste tipo de iluminación, por la generación de corrientes armónicas.

Las lámparas incandescentes, por ser cargas lineales, producen la circulación de corrientes de 60 hz al ser alimentadas por una fuente de voltaje senoidal de la misma frecuencia. Las lámparas fluorescentes en cambio, son cargas no lineales, por lo tanto al aplicarles un voltaje senoidal se produce una circulación de corrientes no senoidales a través de ellas.

Ya que las lámparas fluorescentes de alta eficiencia se conectan a la red de distribución, las corrientes armónicas que se generan pueden fluir a través de los conductores hacia los transformadores en el sistema de distribución.

### **Nuevas fuentes de armónicas.**

Otra de las fuentes principales de distorsiones armónicas en la actualidad son los inversores y rectificadores con control de ángulo de fase.

Las líneas de transmisión de corriente directa producen problemas para los sistemas. Las armónicas en frecuencias altas, causan errores en los sistemas de comunicación dentro de estos se puede mencionar la interferencia sobre las líneas telefónicas, pues al acoplarse las armónicas mutuamente con la red del sistema de potencia a las frecuencias de las mismas, hay fallas. En la actualidad éstas armónicas afectan la operación de ciertos equipos como lo son: motores de c-c, computadoras, máquinas de control numérico, etc., que son muy sensibles a la distorsión en la señal recibida.

El desarrollo de convertidores con dispositivos semiconductores de potencia ha incrementado la producción de armónicos, así el grado de contaminación de armónicas en los sistemas de distribución se ha incrementado considerablemente debido al uso extendido de cargas electrónicas distorsionantes. En el pasado los problemas de armónicas podían ser tolerados tanto por el sobredimensionamiento de los equipos en sus parámetros nominales, como por el hecho de que los transformadores delta-estrella se aterrizaraban.

De hecho, las cargas no lineales más importantes son los convertidores de potencia estáticos, aplicados en controles de velocidad, equipo de control de computo, rectificadores y otras aplicaciones.

Antes cuando las cargas eran pequeñas, se usaban los transformadores con el primario en estrella con el neutro aterrizado y el secundario en delta, que mitigaban un tanto el problema; pero ahora la cuestión se ha complicado porque el uso de convertidores estáticos a proliferado, la resonancia de las redes ha aumentado, el equipo de potencia del sistema y las cargas son más sensibles.

Los convertidores estáticos de potencia son dispositivos semiconductores que convierten potencia de una frecuencia a potencia de otra frecuencia. Los más usados son

el rectificador que convierte potencia CA a potencia CD, y el inversor, que convierte corriente directa a corriente alterna.

Los armónicos de corriente generados por convertidores estáticos, cargas no lineales, se propagan a través del sistema produciendo la aparición de voltajes distorsionados en buses remotos, así como el flujo de corrientes distorsionadas en circuitos lejanos de la carga no lineal que los produjo

### **Futuras fuentes de armónicas.**

A largo plazo se prevé un aumento importante en el contenido de armónicas en las redes eléctricas debido al uso en gran escala de autos eléctricos que requerirán recargar sus baterías en grandes bancos de rectificación.

Otras posibles fuentes de armónicas serán aquellas que requerirán la conversión de grandes volúmenes de energía posiblemente producida por fuentes no convencionales, el uso de ciclo-convertidores para operación de máquinas de baja velocidad y alto par, el uso de dispositivos de conversión directa de energía como baterías de almacenamiento y celdas de combustibles.

### **4.3 NORMATIVIDAD SOBRE EL PROBLEMA DE ARMONICAS.**

Para especificar las medidas adecuadas, que representen una relación balanceada costo-beneficio, es preciso establecer criterios prácticos sobre los niveles permisibles tanto en el sistema eléctrico de una planta industrial, como en los límites de distorsión armónica que pueden fluir en las líneas de transmisión y distribución de una compañía eléctrica suministradora.

Resulta especialmente delicado establecer un criterio que normalice la relación usuario compañía suministradora, ya que esta última tiene derecho a exigir al usuario que

trate de no contaminar su sistema de transmisión y distribución, y el usuario tiene también el derecho de exigir el suministro de energía de buena calidad.

Para lograr estos fines algunos países han establecido límites de distorsión armónica tratando de mejorar la calidad de la energía.

El IEEE ha establecido una norma para mantener las armónicas de corriente o voltaje dentro de límites permisibles para que no dañen a los usuarios de la red de servicio de energía eléctrica. Esta es la norma IEEE-519.

Los problemas con armónicas no se limitan a plantas industriales con cargas no lineales, sino que existe un efecto combinado de todas las cargas no lineales en sistemas eléctricos que tienen una capacidad limitada de absorber corriente de armónicas. Más aún, las compañías son responsables de proporcionar un suministro de alta calidad en términos de nivel de voltaje y forma de onda, el estándar reconoce, no sólo el nivel absoluto de armónicas producidas por una fuente individual, sino que también su tamaño relativo a la red de suministro.

Debe notarse que la norma está limitada a ser una colección de prácticas recomendadas que sirvan como una guía tanto para suministradores, como para consumidores de energía eléctrica. Donde existan problemas debidos a la inyección de corrientes de armónicas o distorsión excesiva de voltaje, es del interés tanto del consumidor, como del suministrador resolver las controversias, dentro de una estructura de trabajo mutuamente aceptable.

#### 4.4 FILOSOFÍA DE LA NORMA IEEE-519.

El propósito de la norma 519 del IEEE es recomendar límites sobre distorsión armónica. Se basa en los siguientes puntos:

1. Los usuarios deberán responsabilizarse para limitar la cantidad de las corrientes armónicas sobre el sistema de potencia en general

2. Las compañías suministradoras deberán responsabilizarse para evitar condiciones de resonancia en el sistema de potencia que puedan crear niveles de distorsión de voltaje inaceptables. Básicamente, la compañía debe suministrar un voltaje de calidad.

#### **Límites de distorsión de corriente.**

Idealmente la distorsión armónica causada por un usuario es limitada para un nivel aceptable en cualquier punto del sistema; y el sistema entero sería operado sin fuertes distorsiones armónicas en cualquier parte del mismo.

Los límites de corriente se basan en el tamaño de la planta del consumidor en relación al tamaño de la red de suministro.

Este tamaño relativo se define como la relación de cortocircuito (SCR), en el punto de acoplamiento común (PCC), el cual es donde la carga del consumidor se conecta con otras cargas en el sistema de potencia. El tamaño de la planta del consumidor se define como la corriente a frecuencia fundamental en la carga  $I_L$ , que incluye todas las cargas ya sean lineales o no. El tamaño del sistema de suministro se define por el nivel de la corriente de cortocircuito  $I_{cc}$  en el PCC. Estas dos corrientes definen la SCR:

$$SCR = I_{cc} / I_L$$

Una relación alta significa que la carga es relativamente pequeña y esos límites de corriente no serán tan estrictos como los pertenecientes a una relación baja. Esto se demuestra en la tabla 4.1 la cual enlista los niveles de distorsión de corriente máximos recomendados como una función de la SCR y el orden de la armónica. La tabla también identifica los niveles de distorsión armónica total (THD)

Los límites de distorsión armónica establecidos en esta norma son para establecer la máxima distorsión de corriente permisible para un usuario; éstas recomendaciones son relacionadas con el siguiente índice:

THD I: Distorsión de la demanda total de corriente. Es la distorsión de corriente armónica en porcentaje de la demanda máxima de la corriente de carga (15 ó 30 min. de demanda.)

El THD I está definido como:

$$THD I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (95)$$

Los límites dados en las tablas usadas como valores de diseño del sistema para casos de operación normal, (condiciones de duración no mayores de una hora). Para periodos cortos, durante condiciones de arranque o condiciones inusuales los límites pueden ser excedidos por un 50%.

La tabla lista los límites de corriente armónica basada sobre el tamaño de la carga con respecto al tamaño de los sistemas de potencia para el cual la carga es conectada.

I cc/ IL	<11	11< h <17	17< h < 23	23 < h <35	35 < h	THD I %
<20	4.00	2.00	1.50	0.60	0.30	5
20 < 50	7.00	3.50	2.50	1.00	0.50	8
50 <100	10.00	4.50	4.00	1.50	0.70	12
100<1000	12.00	5.50	5.00	2.00	1.00	15
> 1000	15.00	7.00	6.00	2.50	1.40	20

Tabla 4-1. Límites de distorsión de corriente armónica en porcentaje de la corriente de carga menores o iguales de 69000 volts.

La tabla 4-1 fija los límites de corriente para las componentes armónicas individuales también como para distorsión armónica total. Por ejemplo un consumidor con una SCR entre 50 y 100 tiene un límite recomendado de 12% para THD, mientras que para componentes armónicas impares individuales con ordenes menores a 11, el límite sobre cada una es de 10 %. Es importante notar que las componentes de corriente armónica individual no se suman directamente. Esto significa que todas las armónicas características no pueden estar en su límite máximo individual sin exceder el THD el siguiente ejemplo demuestra esto:

Supóngase que una fuente con una SCR de 55 tiene solo dos componentes de corriente armónica, de 5° y 7° orden. Ambas están dentro de sus límites individuales de 10%.

$$IA_{5^\circ} = 100 / IL = 10\% \quad \text{y} \quad IA_{7^\circ} = 100 / IL = 10\%$$

Por lo tanto conocemos las dos corrientes armónicas individuales.

$$IA_{5^\circ} = 0.1 IL \quad \text{y} \quad IA_{7^\circ} = 0.1 IL$$

La THD se calcula como:

$$THD = \frac{(IA_{5^\circ}^2 + IA_{7^\circ}^2)^{1/2}}{IL} \times 100 = 14.1\%$$

Así que la THD es igual al 14% en este caso, el cual excede el nivel recomendado de 12%. Es claro que si cualquier otra armónica característica de orden bajo está en su límite, las otras corrientes armónicas tendrán que ser contenidas también dentro de los suyos.

Es importante observar que la tabla 4.1 muestra los límites solamente para armónicas impares, el estándar se refiere a las armónicas pares limitándolas al 25% del límite de las armónicas impares dentro del mismo rango, por ejemplo, una fuente con un PCC menor de o igual a 69 KV y una SCR de 30 podría tener un límite de 3.5% para la 13ª armónica. Esto significa que la 12ª armónica estaría limitada a 0.875 %.

Las armónicas pares dan como resultado una onda de corriente asimétrica, la cual puede contener una componente de CD que saturará los núcleos magnéticos.

Para equipo de generación de potencia eléctrica, la norma no conoce tamaño relativo, los límites son más estrictos y se limitan a los niveles más bajos mostrados en las tablas 4-1, 4-2 y 4-3. Esto es que toda la generación de potencia tiene una SCR de 20 o menos.

Il cc / IL	<11	11< h <17	17< h < 23	23 < h <35	35 < h	THD I %
<20	2.00	1.00	0.75	0.30	0.15	2.50
20 < 50	3.50	1.75	1.25	0.50	0.25	4.00
50 <100	5.00	2.50	2.00	0.75	0.35	6.00
100<1000	6.00	2.75	2.50	1.00	0.50	7.50
> 1000	7.50	3.50	3.00	1.25	0.70	10.00

**Tabla 4-2. Límites de distribución de corriente para sistemas de subtransmisión de 69001 Volts hasta 161000 volts**

Il cc / IL	<11	11< h <17	17< h < 23	23 < h <35	35 < h	THD I %
<50	2.00	1.00	0.75	0.30	0.15	2.50
>50	3.00	1.50	1.15	0.45	0.22	3.75

**Tabla 4-3. Límites de distorsión de corriente para sistemas de transmisión generales Mayores de 161 Kvolts-**

**Límites de distorsión de voltaje.**

El segundo conjunto de criterios establecidos por la norma, es para límites de distorsión de voltaje. Estos gobiernan el valor de distorsión de voltaje que es aceptable en el voltaje de suministro de servicio en el PCC. Los límites de voltaje armónico recomendados se basan en los niveles que son suficientemente bajos para asegurar que los equipos de los consumidores operen satisfactoriamente

Los límites de distorsión de voltaje recomendados se muestran en la tabla 4-4 y están relacionados con siguiente índice:

THD V: Distorsión de voltaje armónico en por ciento del voltaje de frecuencia fundamental nominal.

El THD V; esta definido como:

$$\text{THD V} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V^2_n}}{V_1} \quad (96)$$

Los límites listados en la tabla 4-4 son usados como valores dados del sistema para casos extremos de operación normal (condiciones perdurablemente grandes como de una hora).

Para periodos cortos, durante condiciones inusuales o arranque de motores, los límites pueden ser excedidos en un 50%.

Voltaje del bus en el punto de acoplamiento común (PSC)	Porcentaje de distorsión armónica individual de voltaje	Porcentaje de distorsión armónica de voltaje (THD V)
69 KV y Menores	3.0	5.0
69001 V Hasta 161 KV	1.5	2.5
161001 V y Mayores.	1.0	1.5

**Tabla 4-4. Límites de distorsión de voltaje.**

Así como para la corriente, los límites se imponen para componentes individuales y sobre distorsión total de todos los voltajes armónicos combinados (THD).

De nuevo, en la tabla 4-4 sólo se muestran los límites para armónicas impares. La generación de armónicas pares se restringe más, ya que pueden causar saturación en motores y transformadores, el voltaje armónico par individual se limita a 25 % de los límites de las armónicas impares.

#### 4.5 EFECTOS DE LAS ARMÓNICAS EN LOS CAPACITORES

Una instalación eléctrica industrial es muy compleja, desde un punto de vista eléctrico. Para simplificar esto se tiene:

La energía distribuida por cable, que tiene una resistencia ohmica ( $\rho$ ) y una impedancia inductiva ( $Z$ ) estos dos elementos están en serie con la carga.

La carga en sí misma generalmente consiste de la carga activa o resistiva  $R$ , la carga reactiva de la bobina  $L$ , y una carga capacitiva  $C$ .

##### Corrientes armónicas.

a) Caso inductivo. La impedancia de una inductancia aumenta con la frecuencia.

$$Z_L = 2\pi fL \quad (97)$$

Así la corriente decrece con el aumento de la frecuencia a voltaje constante, el resultado es también que la caída de voltaje en la fuente principal, debido a la inductancia será tan alta como el rango de la armónica presente.

b) Caso capacitivo. La impedancia del capacitor disminuye si la frecuencia aumenta.

$$Z_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (98)$$

La corriente que fluye a través del capacitor es la misma que la frecuencia o cuando el rango de la armónica es más alto.

La impedancia del capacitor decrece con la frecuencia. Por esta razón los bancos de capacitores actúan como resumidero de las armónicas. En un sistema con fuentes armónicas distribuidas, las armónicas convergerán al banco de capacitores. Como un resultado de esto, los problemas con armónicas se muestran primero en los bancos de capacitores. Cuando el problema de armónicas es muy severo; en el banco de capacitores se manifiesta de inmediato con la operación de los fusibles o protecciones y

fallas en el tanque. De esta forma la presencia de armónicas en el banco de capacitores puede causar:

- Incremento de las pérdidas dieléctricas y calentamiento.
- Condiciones de resonancia que incrementen el tamaño de las armónicas.
- Sobrevoltajes.

La distribución de los bancos de capacitores pueden formar un circuito resonante con la inductancia de las líneas de distribución a una frecuencia cercana a la de las armónicas importantes. En este caso, puede ser que las armónicas se amplifiquen en el lugar del capacitor.

En los sistemas reales la amplificación no se realiza demasiado por tres razones fundamentales.

1. Las fuentes armónicas no son fuentes ideales de voltaje.
2. La resistencia del circuito se incrementa con el orden de la armónica, esto reduce el factor de amplificación.
3. La inductancia del circuito decrece con el orden de la armónica, trasladando la frecuencia resonante a valores mayores donde la atenuación es alta.

No obstante lo anterior, la presencia de capacitores amplifican a las armónicas. La tabla 4-5 ilustra los efectos de un banco de capacitores en un sistema real.

Orden de la armónica	Factor de amplificación	Factor de amplificación	Factor de amplificación	Factor de amplificación
3	1.2	3.4	1.6	4.0
5	0.7	1.0	2.4	3.3
7	0.16	0.4	0.14	0.4

**TABLA 4.5. Ejemplo del efecto de un banco de capacitores de 12 KVAR.**

Las condiciones de resonancia se pueden predecir con programas de computadora que son capaces de modelar las frecuencias características de los elementos del sistema de potencia.

Otro efecto de las componentes armónicas en el banco de capacitores es el aumento en el calentamiento debido al incremento de las pérdidas dieléctricas. El incremento de pérdidas debido a las armónicas puede calcularse con la siguiente relación:

$$p = \frac{1}{2} \sum_{n=2}^{\infty} (\tan \alpha)_n C_n W V_n^2 \quad (99)$$

Donde:

P= Incremento de pérdidas.

N= Orden de la armónica.

C= Capacitancia.

(Tan  $\alpha$ )<sub>n</sub> = Factor de pérdidas a la frecuencia de la n-esima armónica.

W = Frecuencia fundamental angular.

V<sub>n</sub> = Valor pico del voltaje n-ésimo.

El sobre voltaje que aparece en un banco de capacitores debido a la presencia de armónicas depende de la relación angular de los voltajes armónicos con el fundamental. Es posible que el sobrevoltaje instantáneo sea mayor que el voltaje rms.

Como los niveles de voltaje que inician extinguen el efecto corona en un capacitor, son función del voltaje de pico y no del voltaje rms, se puede afectar la vida del capacitor.

Los capacitores a diferencia de otros elementos eléctricos tienen estrictos parámetros en la corriente, y en el voltaje.

La utilización de capacitores en los sistemas eléctricos para la corrección del factor de potencia puede provocar condiciones de resonancia cuando existen armónicos en mismo sistema. Estas armónicas dan como resultado grandes corrientes con frecuencias

altas que dan por resultado que la reactancia capacitiva disminuya y que la reactancia inductiva del sistema se incremente.

Esto da por resultado un circuito RLC que puede hacerse resonante a determinadas frecuencias. Al presentar una resonancia se crean oscilaciones entre el voltaje de línea y los voltajes armónicos que en conjunto se suman y crean un voltaje distorsionado creciente en amplitud que puede llegar a dañar al banco de capacitores. Estos voltajes altos provocan altos esfuerzos dieléctricos en el capacitor ocasionando fallas en el mismo. Se presentara una situación resonante si existe una frecuencia dada por:

$$\text{Frecuencia resonante} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (100)$$

Debido a los efectos que pueden producir la presencia de armónicas en una instalación eléctrica, es de mucha utilidad poder determinar el punto armónico de oscilación o de resonancia principalmente en un sistema eléctrico que contenga bancos de capacitores. Para determinar el punto armónico de resonancia de manera aproximada, es necesario conocer la capacidad de corto circuito del sistema y la potencia de cada uno de los bancos de capacitores, aplicando la siguiente formula.

$$Hr = \sqrt{\frac{KVAcc}{KVAR}} \quad (101)$$

Donde:

Hr : Es el punto resonante por unidad de la frecuencia fundamental.

KVAcc : Es la capacidad de corto circuito del sistema.

KVAR : Es la potencia reactiva del banco de capacitores.

Esta ecuación es útil en una evaluación inicial. Si el punto resonante se encuentra cerca de una de las frecuencias armónicas y existen indicios de su existencia, es muy probable que los capacitores se vean afectados.

Para evitar resonancias entre un capacitor y la red, se coloca una inductancia en serie con el capacitor. Esta inductancia es calculada de tal forma que el capacitor y el

ensamble de la inductancia tengan una impedancia inductiva para todas las armónicas posibles de la red.

La reactancia de un capacitor es inversamente proporcional a la frecuencia, por lo tanto, si la tensión aplicada incluye componentes de frecuencias mayores que las fundamental, la corriente total es mayor que la correspondiente a la tensión o frecuencia nominal.

Como resultado de lo anterior, una componente relativamente pequeña de una de las armónicas superiores, puede producir una componente de corriente de magnitud comparable a la de la corriente nominal correspondiente a una tensión senoidal para la frecuencia fundamental. Este fenómeno puede representar un incremento considerable de corriente total y en consecuencia de potencia reactiva.

La corriente total tomada por un capacitor sujeto a tensiones con armónicas es igual a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores de corriente correspondientes a las distintas armónicas incluyendo la fundamental.

La práctica ha demostrado que las armónicas que se encuentran en los sistemas de energía son casi invariablemente las armónicas nones superiores ( 3°, 5°, 7°, etc.). Si las distintas tensiones armónicas se representan por  $h_3$ ,  $h_5$ ,  $h_7$ , etc. Y se expresan en porciento de la fundamental, el valor eficaz de la tensión total resultante está de acuerdo con:

$$V = 0.1V_1\sqrt{(100^2 + h_3^2 + h_5^2 + h_7^2 + \dots)} \quad (102)$$

Y la corriente total está dada por:

$$I = 0.01 I_1\sqrt{(100^2 + 9h_3^2 + 25h_5^2 + 49h_7^2 + \dots)} \quad (103)$$

En donde:

V : Tensión eficaz del circuito.

V<sub>1</sub> : Tensión eficaz a la frecuencia nominal.

I : Corriente eficaz del capacitor

I<sub>1</sub> : Corriente eficaz del capacitor debida a V<sub>1</sub>

H<sub>3</sub>, h<sub>5</sub>, h<sub>7</sub>, ..... son los valores eficaces de la 3<sup>o</sup>, 5<sup>o</sup> y 7<sup>o</sup> etc. Armónicas expresadas en % de E<sub>1</sub>.

El porcentaje de incremento de la potencia reactiva debido a la existencia de tensiones armónicas está dado por la expresión:

$$KVAR = 0.01 ( 3h_3^2 + 5h_5^2 + 7h_7^2 + \dots ) \quad (104)$$

Con la que se obtiene una aproximación aceptable. Debe tenerse presente que la cresta de la onda resultante puede llegar a ser la suma de la cresta fundamental más la suma de todas las crestas de las armónicas individuales.

#### 4.6 CONDICIONES PARA REALIZAR UN ESTUDIO SOBRE ARMONICAS.

Es importante tomar en cuenta las siguientes condiciones, que nos indican cuando sería recomendable realizar un estudio sobre armónicas, que son:

1. Cuando se instalan bancos de capacitores para corrección del factor de potencia en sistemas que se encuentran constituidos en un 20% o más, de convertidores de C.A. o C.D. u otros equipos generadores de armónicas
  
2. En una etapa de diseño durante la selección de equipo, que tienda a generar o producir armónicas.

3. Cuando debido a restricciones de la compañía eléctrica se limita la inyección de armónicas al sistema eléctrico a pequeñas cantidades.
4. Cuando se identifican problemas como los que a continuación se enuncian y que determinan que es muy probable que se tengan armónicas.

- Sobrecalentamiento de transformadores y equipo rotatorio.
- Sobrecarga de líneas de alimentación.
- Sobrecarga de hilos neutros.
- Voltajes y frecuencias inaceptables.
- Distorsión del voltaje de suministro afectando a todos los equipos de una red eléctrica.
- Interferencia que afecta a equipos de comunicación y de procesamiento de datos.
- Desbalanceo de voltaje de sistemas trifásicos.
- Mala regulación del voltaje en las líneas.
- Daños a bancos de capacitores instalados para la corrección del factor de potencia.
- Disparo de interruptores y operación de fusibles en forma inapropiada e inesperada.
- Operación no confiable de equipo electrónico.
- Errores de medición.
- Fallas y errores en equipo sensible a frecuencia.

#### 4.7 FILTROS DE ARMONICAS

En la actualidad, el incremento del uso de diversos tipos ha dado como resultado una gran cantidad de armónicas que al sumarse a la onda fundamental, la distorsionan, y provocan sobrevoltajes y sobrecorrientes, así como resonancia. Esta es de una magnitud tan grande que daña los equipos eléctricos instalados, tales como, transformadores, motores, circuitos impresos, integrados: tiristores, capacitores, diodos, etc. Ocasionando fallas totales y severas.

Estos sobrevoltajes y sobrecorrientes no pueden ser detectados por equipos de medición convencionales, ya que todos ellos están diseñados para frecuencias de 60 hz por lo que las armónicas al ser de frecuencias mayores, pasan desapercibidas para estos equipos de medición.

La manera de detectarlos es utilizando un analizador de armónicas, el cual reconoce diferentes valores de frecuencia, habiendo algunos equipos que pueden sensar hasta la 50 armónica. Las más peligrosas y frecuentes son: 3<sup>a</sup> , 5<sup>a</sup> , 7<sup>a</sup> , 11<sup>a</sup> y 13<sup>a</sup> .

La corrección con capacitores sin proteger puede acarrear problemas de sobreintensidades y sobretensiones, cuando la frecuencia de resonancia de la red se acerque a alguna armónica elevada de la red.

También una armónica elevada provoca una sobre intensidad, en el capacitor que puede destruirlo debido a que la impedancia de éste es inversamente proporcional a la frecuencia. Entonces a mayor frecuencia menor impedancia con lo que la intensidad aumenta considerablemente.

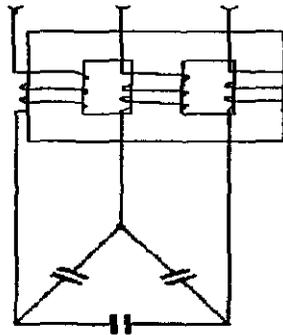
Para evitar estos problemas existen dos soluciones:

##### **A) Reactancias de choque o antirresonancia.**

Consiste en intercalar en serie con el capacitor una inductancia en serie con él, a un valor que no pueda generar peligro alguno con ninguna armónica alejándolos del punto de resonancia de la instalación.

Debido al aumento de tensión que se genera al intercalar una reactancia, el capacitor debe seleccionarse para trabajar a una tensión nominal superior a la de la red.

Una inductancia por pasos debe ser proporcionada en bancos automáticos, siendo esta solución la más económica.



**CAPACITOR PROTEGIDO POR UNA INDUCTANCIA ANTIRRESONANTE**

**FIG. 4-3**

## **B) FILTROS.**

Los reactores protegen dispositivos eléctricos pero no eliminan las armónicas. Si un usuario no puede o no desea transferir las armónicas, pero quiere eliminarlas, es necesario instalar filtros reales. En la práctica no son usados para armónicas arriba de la 13ª, por que su amplitud es despreciable en relación a la amplitud fundamental. Ocasionalmente, sin embargo, puede ser necesario eliminar una armónica de alto rango específico si esta perturbando la red.

### **Filtros pasivos.**

Un filtro consiste en un capacitor conectado en serie con una inductancia de tal modo que la frecuencia resonante, del ensamble es igual a la frecuencia de la armónica que se

desea eliminar. Estas frecuencias armónicas, son absorbidas en su mayor parte por el filtro, quedando en la red una parte pequeña de ellas.

*El dimensionamiento del filtro requiere un análisis muy cuidadoso de las condiciones de la red porque la reactancia de esta varía al cambiar la configuración de la misma, por lo que entonces el filtro pierde sus propiedades de absorción de armónicas*

Los filtros pasivos son arreglos LC conectados en serie, que funcionan como filtros, son más baratos que los filtros activos pero también son más inestables.

### **Filtros activos.**

Para corregir en gran parte la contaminación de armónicas, generada por el uso de inversores, rectificadores y otros equipos, se pueden colocar filtros pasivos o activos en las líneas de alimentación del sistema. Los filtros activos están constituidos por otro puente inversor que genera las contra armónicas necesarias para limpiar la contaminación generada por el inversor o rectificador original.

Cuando se conecta una carga no lineal a la red eléctrica, hay un flujo de armónicas, que distorsionan, la onda fundamental de corriente, al conectar un filtro activo entre la red y la carga, las armónicas, solo fluirán entre el filtro y la carga compensando así la onda de alimentación senoidal pura.

La onda de corriente y voltaje en la carga es medida y analizada a través de la técnica DSP (Digital Signal Processing), la cual muestra la condición actual de la onda de carga y a través de un anillo de control envía la señal al módulo de potencia para ajustar la frecuencia de swicheo, compensando así las armónicas de la carga.

La unidad de control permite manejar desde 1 hasta 8 módulos con una capacidad individual de 200 A rms permitiendo una alta flexibilidad en cuanto a instalación, distribución y operación adecuándose a las necesidades del usuario.

La capacidad de 200 A rms por módulo permite una amplia gama de filtrado para las diferentes armónicas que se presentan simultáneamente, se observa que se puede filtrar los siguientes valores de armónicas con un solo módulo de potencia:

- 50 A rms de la fundamental (compensación del factor de potencia)

- 150 A rms de la 5ª armónica.
- 100 A rms de la 7ª armónica.
- 50 A rms de la 11ª armónica.
- 50 A rms de la 13ª armónica.

Por las características mencionadas anteriormente permite emplearse en procesos tales como: la industria del papel, plástico y cemento, donde la cantidad de motores de inducción con variadores de velocidad es la carga principal y es importante tener un rápido filtrado, para no afectar la calidad del producto final y aplicaciones en donde no solo se encuentran características similares, si no además existan variaciones muy drásticas en la carga (automotriz, metalúrgica, etc.).

El filtro activo a diferencia del pasivo no es necesariamente un generador de potencia reactiva, lo cual lo hace ideal para filtrar armónicas en instalaciones con un factor de potencia unitario ó capacitivo.

Además, este filtro puede operar en condiciones de sobrecarga o baja carga, sin poner en riesgo la confiabilidad y seguridad del sistema

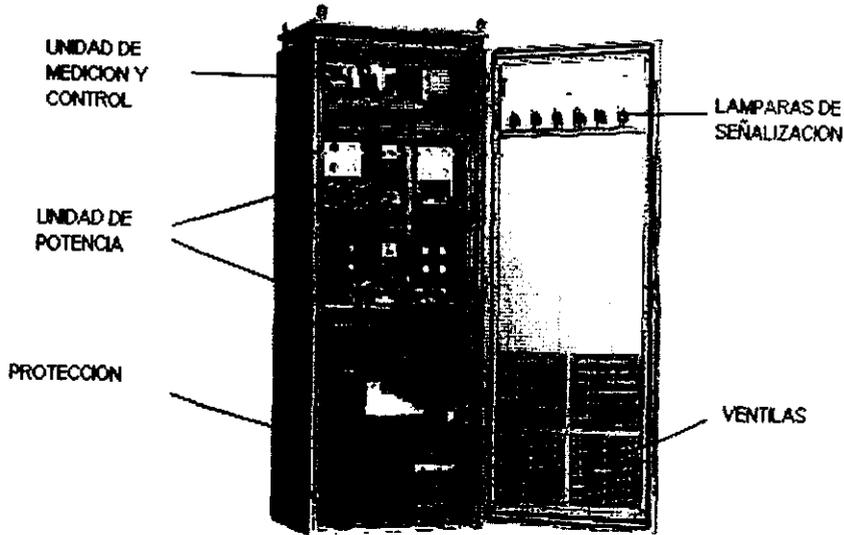
### **Especificaciones técnicas.**

- Frecuencia 60 Hz.
- Tensión de operación: Mod. PQFA 440 Vrms  $\pm$  10%  
Mod. PQFB hasta 1000 Vrms  $\pm$  10%
- Capacidad de filtrado 200 A rms/ modulo (max. 1600 Arms)
- Amplio rango de filtración para las principales armónicas desde la 2ª hasta la 25ª
- Diseño de acuerdo a las normas IEC 1000-2-2, IEEE 519
- Niveles de interferencia electromagnética; se establecen de acuerdo a necesidades específicas de la instalación.

- Gabinete en dimensiones normalizadas
- Operación tipo interior.
- Equipo de protección contra sobrecargas y corto circuito.
- Equipo de ventilación forzada incluido.
- Lámpara de señalización tipo led.

FILTRO ACTIVO.

MODULO DE POTENCIA Y CONTROL (VISTA FRONTAL)



MODULO DE POTENCIA Y CONTROL (VISTA POSTERIOR)

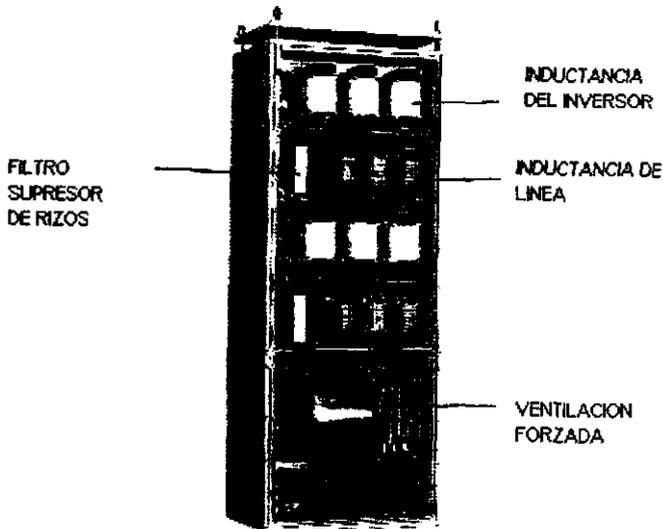


Fig. 4-4 Filtro Activo

## CAPITULO CINCO

### CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA EN EL HOSPITAL CENTRAL NORTE DE PEMEX.

#### 5.1 ANALISIS Y CALCULO DE LA POTENCIA NECESARIA DEL BANCO DE CAPACITORES PARA CORREGIR EL F.P.

Petróleos Mexicanos, ha generado sobre todo, a partir de la expropiación petrolera grandes divisas para México, convirtiéndose en una de las empresas más importantes del país.

El hospital central norte forma parte del corporativo de PEMEX, depende de la gerencia de servicios médicos, el hospital se encuentra ubicado en campo maillas N°. 52 en la delegación de Azcapotzalco D.F.

*El hospital de PEMEX, tiene como finalidad brindar, una atención medica integral, con absoluto respeto a la vida, en base al uso de los recursos, para contribuir a la mejora de la calidad de vida y productividad de los trabajadores.*

Los valores de consumo y factor de potencia que se han tenido en la facturación se detallan en la tabla de facturación tabla 5-1, como se puede observar que se tiene un promedio de factor de potencia de 0.88% lo cual es penalizado ya que la compañía suministradora exige que el factor de potencia sea mayor del 90%.

Este inmueble cuenta con alimentación de 23 KV y con dos transformadores en su subestación de 500 KVA cada uno, con una relación de transformación de 23000 /220-127.

Por el tipo de carga que presenta el inmueble, se considera muy variable, por lo tanto se recomienda una compensación central.

Realizando el análisis se requiere de 60 KVAR para que el factor de potencia sea cuando menos de 92%.

FACTURACIÓN EN EL HOSPITAL DE PEMEX						
5/04/96	9/05/96	173000	360	0.881	34	48671.55
9/05/96	7/06/96	162000	360	0.879	29	44468.15
7/06/96	7/07/96	153000	380	0.879	30	43146.65
7/07/96	8/08/96	166000	360	0.879	32	46806.70
8/08/96	7/09/96	156000	360	0.887	30	43480.10
7/09/96	6/10/96	151000	370	0.887	29	41368.85
6/10/96	7/11/96	155000	370	0.880	32	43136.65
7/11/96	6/12/96	155000	300	0.883	29	41256.35
6/12/96	8/01/97	144000	300	0.857	33	44022.00
8/01/96	7/02/97	161000	260	0.894	30	48104.60
7/02/96	7/03/97	145000	300	0.885	29	47427.85
7/03/97	1/04/97	114909	300	0.870	24	38048.00
PROMEDIOS		152992	335	0.88	361	44161.56

Tabla 5-1. Facturación en el hospital de PEMEX..

F.P. DESEADO	KVAR REQUERIDOS
0.9	18.18
0.92	37.71
0.95	70.31
0.97	96.47

Tabla 5-2. Kvar requeridos para corregir el F.P.

El importe facturado promedio mensual es 44161.56 mas iva y el porcentaje de recargo por bajo factor de potencia de acuerdo con la fórmula es:

$$\text{PORCENTAJE DE RECARGO} = \frac{3}{5} \times \left[ \left( \frac{0.9}{0.88} \right) - 1 \right] \times 100 = 1.4\%$$

$$\text{CARGO POR BAJO F.P.} = (\$44161.56)(0.014) = \$618.26 + 92.7 = 710.9 \text{ mensual}$$

Para evitar el pago de la multa se debe mantener el F.P. por lo menos a 0.90. aparte de evitar la multa obtendremos algunos beneficios adicionales.

Los datos de los transformadores en donde se realizo la medición son:

Transformador 1  
 Capacidad 500 KVA  
 Impedancia 5.1%

Transformador 2  
 Capacidad 500 KVA  
 Impedancia 4.48%

Debido a que la impedancia de los transformadores son diferentes, no es recomendable que estén conectados en paralelo, ya que por la diferencia de impedancia entre ellos la carga no se distribuye uniformemente entre los mismos.

Por lo que se recomienda que los transformadores sean separados y se distribuyan las cargas entre ellos, y en caso de ser necesario se podría utilizar un interruptor de enlace para cuando se requiere pasar la carga a uno de los transformadores.

## 5.2 MEDICIONES EFECTUADAS.

Se realizaron mediciones de parámetros eléctricos en los transformadores 1 y 2 de 500 KVA cada uno, mediante un analizador de redes, estos están conectados en paralelo por lo que se midió en la salida de el interruptor general, en las barras que salen hacia la carga tablas 5-3, 5-4, 5-5 y 5-6.

*Los parámetros que se registraron son:*

- Tensión entre líneas y trifásico.
- Tensión de fase a neutro.
- Intensidad entre fases y trifásica.
- Potencia activa.
- Potencia aparente.
- Potencia reactiva.
- Factor de potencia.
- Distorsión armónica total en voltaje y corriente.
- Distorsión armónica individual hasta la 25° armónica en voltaje y corriente.

**TRANSFORMADOR UNO Y DOS.**

**INTERRUPTOR GENERAL.**

INSTANTÁNEAS				
VOLTAJE	126.50	126	125.80	218.40
CORRIENTE	791.10	746.10	813.20	783.50
POTENCIA ACTIVA	92.53	88.90	95.53	276.90
FACTOR DE POTENCIA	0.92	0.95	0.93	0.93
THD VOLTAJE	0.60	0.70	0.70	
THD INTENSIDAD	8.10	9.70	7.60	
	L1-L2	L2-L3	L3-L1	
VOLTAJE	218.70	218	218.50	

**Tabla 5-3. Mediciones instantáneas efectuadas.**

POTENCIA ACTIVA	95.18	91.93	103.60	290.70
POTENCIA APARENTE	102.60	97.60	110.40	310.60
POTENCIA REACTIVA	38.51	32.83	38.19	109.50
FACTOR DE POTENCIA	0.92	0.94	0.93	0.93

**Tabla 5-4. Promedio de 15 minutos.**

**TRANSFORMADOR 1 Y 2 INTERRUPTOR GENERAL**

H	L1	L2	L3	L1	L2	L3
1	126.80	126	126.70	825.30	715.80	819.90
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	31.98	24.78	25.89
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.79	0.95	0.95	15.61	14.23	16.15
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	9.84	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 5-5. Distorsión armónica individual.

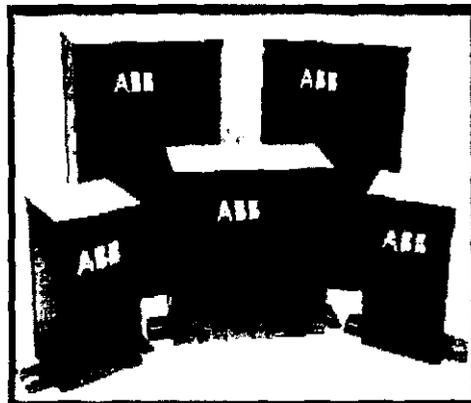
L1	L2	L3	L1	L2	L3
0.62	0.75	0.75	4.47	4.04	3.72

**Tabla 5-6. Distorsión armónica total.**

Los valores de distorsión armónica medidos en la línea no exceden los valores recomendados por las especificaciones IEEE 519, gracias a esto la afectación que tienen los capacitores conectados, por disturbios armónicos es mínimo. Además que los capacitores según la NOM-218 deben ser capaces de soportar el 135% de su potencia nominal incluyendo la fundamental y las armónicas.

### 5.3 EQUIPO A INSTALAR

De acuerdo al análisis realizado se instalaron 2 capacitores de 30 KVARs, cada uno a 220 volts, 60 hz, en gabinete para servicio interior, en conexión interna en estrella, autorecuperable, con resistencia de descarga, con protección termomagnética de 100 A estos se conectaron al interruptor principal de cada uno de los transformadores, con esto se incluye el caso de que los transformadores continúen conectados en paralelo, o bien el caso de que los capacitores sean separados.



### 5.3.1 Costo de la instalación.

El costo total de la instalación eléctrica de el banco de capacitores fue \$ 31992.10, a continuación se detalla.

DESCRIPCION	CANTIDAD	P.U.	IMPORTE
<b>Banco de capacitores de 30 KVAR</b>			
Marca ABB, en gabinete.	2 Pz.	6292.00	12584.00
<b>Interruptor termomagnético, marca</b>			
SQUARE D, en gabinete de 3x100 Amp.	2 Pz.	1856.00	3712.00
Cable THW Cal. 2 marca Condumex.	50 mts.	24.00	1200.00
Cable THW Cal. 8 marca Condumex.	50 mts.	7.00	350.00
Zapata terminal para cable Cal. 2.	12 Pz.	18.00	216.00
Zapata terminal para cable Cal. 8.	12 Pz.	13.00	156.00
Materiales varios y soportería.	1 Lote	775.00	775.00
Mano de obra especializada.	1 Lote	6327.00	6327.00
Supervisión técnica.	1 Lote	1529.22	1529.22
Transportes y maniobras.	1 Lote	970.00	<u>970.00</u>
			\$ 27819.22
		15% I.V.A.	<u>4172.88</u>
		<b>TOTAL</b>	<b>\$ 31992.10</b>

En las facturas posteriores se observa que el factor de potencia se corrigió a 0.98 por lo que el porcentaje de bonificación es de 2.04 %

Por lo que la bonificación será de \$ 1036.00 mensual

Por lo que el periodo de recuperación de la inversión será:

$$\text{Amortización} = \frac{\text{precio de la instalación del banco de capacitores}}{\text{Recargo mensual} + \text{bonificación}}$$

$$\text{Amortización} = \frac{31992.10}{710.99 + 1036.00} = 18.3 \text{ Meses}$$

Por lo que el costo de la instalación se recupera en 18 meses.

### 5.3.2 Beneficios adicionales.

El F.P. se corrigió a 0.98 por lo tanto la liberación de potencia del transformador será:

Potencia demandada del transformador con F.P. = 0.88

$$KVA_1 = \frac{KW}{F.P.} = \frac{335KW}{0.88} = 380.68KVA$$

Potencia demandada por el transformador con F.P.= 0.98

$$KVA_2 = \frac{KW}{F.P.} = \frac{335KW}{0.98} = 341.83KVA$$

La liberación de potencia en el transformador será entonces.

$$\text{LIBERACION DE POTENCIA} = 380.68KVA - 341.83KVA = 38.85KVA$$

La reducción de corriente en los alimentadores será:

Corriente con F.P.= 0.88

$$I_1 = \frac{(KW)(1000)}{\sqrt{3}(V)(F.P.)} = \frac{(335KW)(1000)}{1.73(220V)(0.88)} = 1000.2A$$

Corriente con F.P.= 0.98

$$I_1 = \frac{(KW)(1000)}{\sqrt{3}(V)(F.P.)} = \frac{(335KW)(1000)}{1.73(220V)(0.98)} = 898.15A$$

$$\text{Reducción De Corriente} = I_1 - I_2 = 1000.2A - 898.15A = 102.05A$$

*Disminución de la caída de tensión.* La caída de tensión es directamente proporcional a la corriente que circula por el circuito, por lo que al disminuir dicha corriente, la caída de tensión disminuye en el mismo porcentaje.

$$\%V = 100 - \left[ 100X \frac{I_2}{I_1} \right] = 100 - \left[ 100X \frac{898.15}{1000.2} \right] = 10.2\%$$

## **INSTRUCTIVO DE INSTALACIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE CAPACITORES ABB, PARA CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA.**

### **INSTALACION:**

1. Con el fin de facilitar la disipación de calor, el capacitor deberá instalarse en un lugar ventilado; esta unidad es únicamente para servicio interior y por lo tanto no deberá ser colocada a la intemperie o en un ambiente altamente húmedo.
2. Cuando se aloje el capacitor dentro de un tablero o gabinete cerrado, verifique que tenga ventilación adecuada; en caso contrario, proporcione ventilación forzada.
3. La distancia mínima entre el capacitor y la pared y/o cualquier otro objeto, deberá ser de 5 cm. Además se recomienda montar sobre una base metálica apropiada.
4. Por seguridad, el capacitor deberá tener un medio de desconexión y protección, ya sea por cuchilla fusible o interruptor termomagnético. En caso de utilizar fusible este deberá ser de 165% del valor de la corriente nominal. Si se usa un interruptor termomagnético, su capacidad deberá ser de 135% del valor de la corriente nominal del capacitor.
5. El capacitor deberá fijarse adecuadamente al piso, tablero o pared, utilizando la tomillería y accesorios adecuados al peso del mismo, no debe montarse en lugares donde este expuesto a vibraciones, calor excesivo, polvo u otras condiciones que lo pudieran dañar.
6. El capacitor está provisto de birlos tipo perno, para recibir cables con zapata tipo ojillo; para conectarlo, únicamente retire la tuerca superior del birlo, coloque la zapata y vuelva a colocar la tuerca ajustándola adecuadamente, sujetando simultáneamente la tuerca inferior para evitar que gire el birlo. Efectúe la misma operación para la conexión a tierra física.
7. Los cables alimentadores del capacitor deberán colocarse en la tubería adecuada, de acuerdo a las normas D.G.N.

**OPERACIÓN:**

1. Antes de proceder a energizar el capacitor, verifique que todas las conexiones hayan sido realizadas correctamente, sin falsos contactos, debidamente aterrizado.
2. Una vez energizado, mida las corrientes de fase y el voltaje de la línea para asegurarse que el capacitor esta funcionando normalmente.

**MANTENIMIENTO:**

1. Antes de realizar cualquier verificación o modificación, asegúrese que el capacitor esté desconectado y descargado. Para descargarlo, quite la corriente, espere un minuto y cortocircuite sus terminales con un cable aislado.
2. El mantenimiento de un capacitor consiste básicamente de lo siguiente:
  - Revisar que las terminales estén correctamente apretadas.
  - Verificar que este libre de polvo y suciedad.
  - Asegúrese que durante su funcionamiento, no genere calor excesivo y que sus valores de voltaje y corriente sean los especificados en la placa de datos.



### CONCLUSIONES.

El bajo factor de potencia menor a 90% lo penaliza la compañía suministradora con una multa en base a un porcentaje sobre la facturación total del consumo de energía eléctrica. Así mismo la compañía suministradora proporciona una bonificación cuando se tiene un factor de potencia mayor del 90%.

Por lo que dada la política del gobierno para fomentar el ahorro de energía eléctrica y tomando en cuenta que el costo de este insumo es cada vez mas alto, es importante considerar las posibilidades de ahorro de energía del sistema.

Adicionalmente a la eliminación de la multa, el elevar el factor de potencia en una instalación eléctrica redundo en beneficios de varios tipos como: reducción de pérdidas en conductores, reducción de pérdidas en transformadores, mejor regulación de voltaje en transformadores, menor caída de voltaje en los conductores, liberación de potencia aparente en el transformador, alivio de la capacidad del sistema existente.

Mediante la comprensión de conceptos básicos de las ondas senoidales, así como de un análisis de un circuito RLC, se puede comprender, lo que son los tres tipos de potencias existentes en una red eléctrica. Así como lo que es el factor de potencia, que no es mas que el coseno del ángulo de defasamiento entre el voltaje de fase la corriente de fase, este defasamiento, depende principalmente del tipo de carga alimentada: capacitiva inductiva y resistiva.

Para determinar el factor de potencia se puede recurrir a diferentes instrumentos de medición desde los más básicos como: voltímetro, amperímetro wattmetros etc., así como de los mas sofisticados como el analizador de redes.

Los capacitores de potencia son la forma mas práctica y económica, para corregir el factor de potencia, sobre todo en instalaciones existentes. El costo de los capacitores se recupera rápidamente, si se toma en consideración que los bancos de capacitores tienen una vida promedio de 15 años, que su garantía es de 18 meses y que los gastos por concepto de mantenimiento son casi nulos; se ven de inmediato las ventajas por corregir el factor de potencia por medio de bancos de capacitores.

Otro aspecto importante, a considerar, es el estudio de las condiciones eléctricas del sistema, esto es la distorsión que sufren las ondas de voltaje y corriente, debido a elementos electrónicos, esto es el nivel de armónicas existente que pueden ocasionar en la red y en los capacitores instalados daños graves.

Para evitar estos daños, antes de instalar un banco de capacitores debe realizarse un estudio, del nivel de armónicas existente en el sistema y de esta forma, realizar las acciones necesarias, mediante la eliminación de estas, por medio de filtros.

Cada instalación eléctrica tiene condiciones particulares las cuales deben ser evaluadas cuidadosamente, en relación al factor de potencia y a las acciones necesarias para corregirlo. Al respecto la asistencia de personal capacitado es recomendable, para tomar la decisión que reporte mayores beneficios tanto técnicos como económicos.

BIBLIOGRAFIA

- **Circuitos eléctricos.**  
Joseph A. Edminister.  
Mc. Graw Hill 1990.
- **Compensación de potencia reactiva en sistemas eléctricos.**  
Juan Antonio Yebra Morón.  
Mc. Graw Hill.
- **Estaciones transformadoras y de distribución.**  
Gaudencio Zoppetti Judez.  
Gilli.
- **El abc de las instalaciones eléctricas industriales**  
Gilberto Enríquez Harper.  
Limusa.
- **Corrección del factor de potencia  $\cos \Phi$ .**  
Heinz Paeg.  
Marcombo Siemens.
- **Elementos de diseño de subestaciones eléctricas.**  
Gilberto Enríquez Harper.  
Limusa.
- **Análisis y diseño de sistemas eléctricos para plantas industriales.**  
Irwin Lazar.  
Limusa.
- **El capacitor.**  
Heinz Paeg.  
Marcombo Siemens.

- **Control de armónicas en sistemas eléctricos industriales.**  
Unidad de ingeniería especializada C.F.E.
- **Norma Oficial Mexicana NOM-J-203 1989.**  
Capacitores para la corrección del factor de potencia.
- **Aspectos básicos del factor de potencia orientados al ahorro de energía eléctrica.**  
Fide.
- **Guía rápida de capacitores ABB para corrección del factor de potencia.**
- **Publicaciones sobre corrección del factor de potencia de ABB.**
- **Publicaciones del fideicomiso para el ahorro de energía FIDE.**
- **Revista informativa del ahorro de energía eléctrica.**  
Año 6. Núm. 27 abril-junio 1998.