



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

CAMPO 4



**"CORRECCION DE FACTOR DE POTENCIA LOCAL  
POR MEDIO DE CAPACITORES"**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A

**P.I.M.E Victor Manuel Cuevas Rodriguez**

ASESOR DE TESIS

Ing. Esteban Corona Escamilla

COASESOR DE TESIS

Ing. J. Juan Contreras Espinosa.

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO, OCTUBRE 1994.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



## **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 está 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  
AVENIDA R  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

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



DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME BOLLER TORRES  
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN  
P R E S E N T E .

ATN: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:  
" Corrección de factor de potencia local por medio de capacitores "

que presenta el pasante Victor Manuel Cuevas Rodríguez  
con número de cuenta: 8301262-4 para obtener el TITULO de:  
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicha tesis 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"  
Cuautitlan Izcalli, Edo. de Mex., a 26 de Septiembre de 1994

PRESIDENTE Ing. Javier Hernández Vega  
VOCAL Ing. Esteban Corona Escamilla  
SECRETARIO Ing. Juan Contreras Espinosa  
PRIMER SUPLENTE Ing. Jaime Rodríguez Martínez  
SEGUNDO SUPLENTE Ing. Casildo Rodríguez Arciniega

[Firma] 24/SEP/94  
[Firma] 26/SEP/94  
[Firma] 26/SEP/94  
[Firma] 24/SEP/94  
[Firma] 5-OCT-94

DEDICATORIA

DEDICO ESTA TESIS A QUIENES TANTO SE AFANARON Y COTRIBUYERON  
A MI FORMACION PROFESIONAL " MIS PADRES Y MAESTROS "  
Y MUY ESPECIALMENTE A MI HIJO OMAR ABRAHAM.

TOM-ABU.

# CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCION	1
CONVENCIONES	2
EXPLICACIONES	3
<b>CAPITULO UNO</b>	
<b>ELEMENTOS ELECTRICOS PASIVOS</b>	
1.1 Elemento resistivo	6
1.2 Elemento inductivo	8
1.3 Elemento capacitivo	14
<b>CAPITULO DOS</b>	
<b>POTENCIA</b>	
2.1 Cálculo de potencia	22
2.2 Definición de la potencia	30
<b>CAPITULO TRES</b>	
<b>FACTOR DE POTENCIA</b>	
3.1 Definición y cálculo del factor de potencia	65
3.2 Instalaciones con bajo factor de potencia	67
3.3 Factor de potencia de una instalación	70
3.4 Pérdidas en los cables	71
3.5 Cálculo de conductores	75
3.6 Pérdidas en un transformador	87
3.7 Causas de variación del factor de potencia por motores asíncronos	94

**CAPITULO CUARTO****CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA POR CAPACITORES**

4.1 Por qué el uso de capacitores.	97
4.2 Cálculo de capacitores.	99
4.3 Uso de tablas y nomogramas.	107
4.4 Compensación en motores.	113

**CAPITULO QUINTO****BANCO DE CAPACITORES**

5.1 Capacitor recomendado.	121
5.2 Instalación de capacitores.	123
5.3 Banco automático de capacitores.	127
5.4 Dispositivos de descarga.	131
5.5 Ejemplo Industrial.	136

**ANEXOS**

109

### OBJETIVO

PROPORCIONAR UNA HERRAMIENTA PARA OBTENER CON RAPIDEZ Y EFICIENCIA  
LOS VALORES DE CAPACITORES PARA LA CORRECCION DEL FACTOR DE  
POTENCIA. ASI COMO SUS FORMAS DE INSTALACION.

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

En los circuitos de corriente alterna, en la mayoría de las cargas de potencia, el voltaje y la corriente no están en fase y su producto ( $V \times I$ ) representa una potencia aparente. Esta potencia aparente debe entonces ser multiplicada por un factor, dependiente de la diferencia de fase para determinar la potencia real.

Este factor se conoce como factor de potencia, que numéricamente es igual al coseno del ángulo de atraso o ángulo de adelanto de la corriente con respecto al voltaje. En un circuito capacitivo la intensidad de la corriente avanza o adelanta con respecto a la tensión y no puede sobrepasar a los  $90^\circ$  lo cual se lograría por una capacidad pura. En un circuito inductivo la intensidad de corriente está defasada en atraso respecto a la tensión en razón a la propiedad de autoinducción que tienen las bobinas integrantes de un circuito y no pueden alcanzar un ángulo de fase de  $90^\circ$ , pues no existe inducción perfecta, lo que requeriría una bobina desprovista de toda resistencia.

El único caso en el cual no hay defase entre tensión y la corriente (ángulo 0), lo tendremos en un circuito constituido por una resistencia pura, la componente que se encuentra en fase se le llama activa, por que al efectuar el producto ( $V \times I$ ) se obtiene la potencia activa o real del circuito siendo la única corriente susceptible de ser transformada en energía mecánica (torque o  $P_{\text{eff}}$ ).

La componente defasada se llama componente reactiva o magnetizante y suministra una potencia que sirve para establecer el circuito

magnético de un motor, pero no contribuye directamente a la potencia del motor.

La potencia que resulta de la componente reactiva de la intensidad de la corriente se llama potencia reactiva tema principal de la tesis, ya que cuando mayor es el ángulo de defasamiento, mayor es el valor de la componente reactiva de una corriente dada; provocando que se consuman mucho mayor corriente de la que se debe consumir y no sean utilizados a su máxima potencia, afectando con esto la eficiencia del sistema y por lo tanto costo de la energía mayor y pérdida de la potencia activa.

Para solucionar este problema en este documento se recomienda el uso de capacitores locales, para la corrección del factor de potencia provocado por los motores y transformadores de una instalación industrial o comercial en el caso de utilización de lámparas fluorescentes.

Cuando el factor de potencia es mejorado o corregido por la instalación de capacitores de polipropileno metalizado, se obtienen los siguientes beneficios.

- Reduce la carga en transformadores y equipo de distribución.
- Reduce las pérdidas por  $I^2R$  en transformadores, cables de distribución y otros equipos, resultando un ahorro directo de kilowatts hora de consumo.
- Ayuda a estabilizar el voltaje del sistema.

## E. INTRODUCCION

El presente documento está organizado de la siguiente manera:

En el capítulo primero se hace un análisis sobre la componente vectorial de la corriente, en los dispositivos pasivos básicos, que son: la resistencia, la bobina y el capacitor; como también el porque se origina el desfase entre la corriente y el voltaje al utilizar dichos componentes.

En el capítulo dos se definen las ecuaciones básicas del cálculo de la potencia. Asimismo se da una interpretación física de las diferentes potencias, como también sus métodos de medición.

En el capítulo tres se analiza el factor de potencia que es el factor resultado del desfase de la corriente respecto al voltaje, el cual provoca pérdidas en un sistema, reduce la eficiencia de los equipos, etc.

En el capítulo cuatro se proporcionan las herramientas y métodos para corregir el factor de potencia. Así, como el lugar más adecuado para su conexión.

En el capítulo cinco se describe y calcula los elementos que conforman un banco automático de capacitores, también la programación de sus adicamentos, su conexión interna, elementos de protección, etc.; por último se analiza teóricamente y prácticamente un ejemplo, que nos permite ver la factibilidad de los métodos descritos en el documento.

U 9 9 7 U 2 0 U 7 0

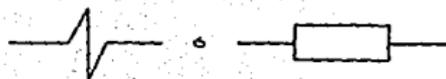
ELEMENTOS ELECTRICOS PASIVOS

### 1.1 ELEMENTO RESISTIVO

Cierto número de factores determinan la resistencia de una sustancia al paso de la corriente eléctrica. Primero, cuando mayor es el número de electrones libres presentes en la sustancia, menor es la resistencia. Cuando más largo es un objeto, mayor es la resistencia. Si es mayor el área de sección transversal, menor será la resistencia al flujo de la corriente; en general los metales ofrecen una resistencia más alta a temperaturas más elevadas.

La unidad de resistencia es el ohmio. Por acuerdo internacional, el ohmio es la resistencia al paso de la corriente que ofrece una columna uniforme de mercurio, de 106,3 centímetros de largo, con una área de sección transversal de un milímetro, a 0°C. El símbolo que representa el ohmio, es la letra griega mayúscula ( $\Omega$ ) omega. En una fórmula eléctrica, la letra mayúscula ( $R$ ) representa la resistencia.

Un horno eléctrico resistivo, un radiador, una lámpara incandescente de luz, etc., son todas ellas cargas resistivas. Tales cargas son referidas como si tuvieran una cierta resistencia, y gráficamente una resistencia es representada así:



El flujo de corriente en un circuito eléctrico, se origina por la presión eléctrica o fuerza electromotriz. Si esta fuerza electromotriz es continua, la corriente también es continua. Si es alterna, la corriente resultante, también será alterna.

En un circuito resistivo alimentado por una fem de ca, la resistencia no afecta la relación de fase entre la corriente y el voltaje. Es decir la corriente y el voltaje están en fase y su tendencia natural será la de causar un flujo de corriente con una forma de onda sinusoidal similar al del voltaje. La corriente y el voltaje llegarán a cero juntos, ascenderán y bajarán al mismo tiempo, y alcanzarán sus valores máximos a la vez. Esta relación se expone en la gráfica que aparece en la figura 1.

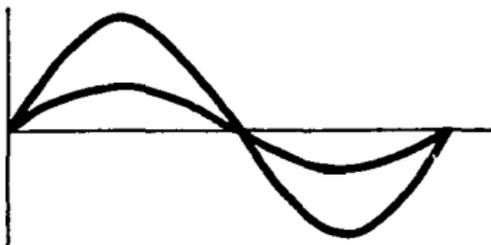


fig. 1 Gráfico que muestra un circuito constituido por resistencia pura.

Como no hay desfase entre tensión y corriente su vector formado tendrá un ángulo ( $\theta=0$ ), es decir, dicho circuito no es afectado por ningún coeficiente de auto-inducción ni de capacitancia, lo que constituye un caso rarísimo en la práctica, el cual se representa en el diagrama 2.

$$I = V/R$$

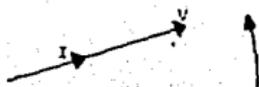


Fig. 2 Diagrama del Vector de un circuito resistivo.

Una resistencia absorbe potencia (en watts) igual a:

$$P = VI = RI^2 = V^2/R$$

Dependiendo del tiempo conectado, la energía se consume y pasaremos un cierto número de kWh.

## 1.2 ELEMENTO INDUCTIVO

Al igual que la resistencia el circuito más comúnmente encontrado es el circuito inductivo. Cargas inductivas son encontradas en cualquier lugar donde haya bobinados involucradas, por ejemplo, en transformadores, motores, balastros, etc.

Las inductancias son denotadas por la letra (L) y expresadas en unidades de Henrys (H), que es la inductancia de un circuito o componente que producirá una fuerza electromotriz inducida de un voltio con un cambio de un amperio por segundo en la corriente que pasa por él.

Gráficamente la inductancia (choque o bobina) se representa así:



Al comenzar a fluir la corriente, se establece un campo magnético en torno de una bobina. Al desarrollarse éste, atraviesa las vueltas de la bobina, induciendo en ellas una fuerza electromotriz. Cuando la corriente alcanza un valor constante, el campo magnético, también se hace constante, y la fuerza electromotriz cae a cero. Cuando la corriente baja, la fuerza electromotriz inducida aparece una vez más.

La fuerza electromotriz inducida y la corriente que establece, siempre se mantienen en una dirección opuesta a cualquier campo magnético existente. Por lo tanto, si aumenta la corriente original (fuente) y hace crecer el campo magnético alrededor de la bobina, la fuerza electromotriz inducida hace que la corriente inducida fluya en una dirección que establezca un campo magnético opuesto al originado por la corriente de la fuente. Si ésta disminuye y hace desaparecer el campo magnético, la fuerza electromotriz inducida hace que la corriente inducida fluya en una dirección que desarrolla un campo magnético que ayuda al campo magnético original y así, tiende a impedir que desaparezca.

Debido a que actúa en oposición a cualquier cambio en la corriente de la fuente y el voltaje de la misma que hace fluir esta corriente, la fuerza electromotriz inducida se llama contravoltaje, o fuerza contraelectromotriz (fcem).

La propiedad de un circuito de oponerse a los cambios en la corriente que lo atraviesa, se llama inductancia. Esta propiedad

se debe a los voltajes inducidos en el circuito por el campo magnético cambiante, tal como se muestra en la figura 3.

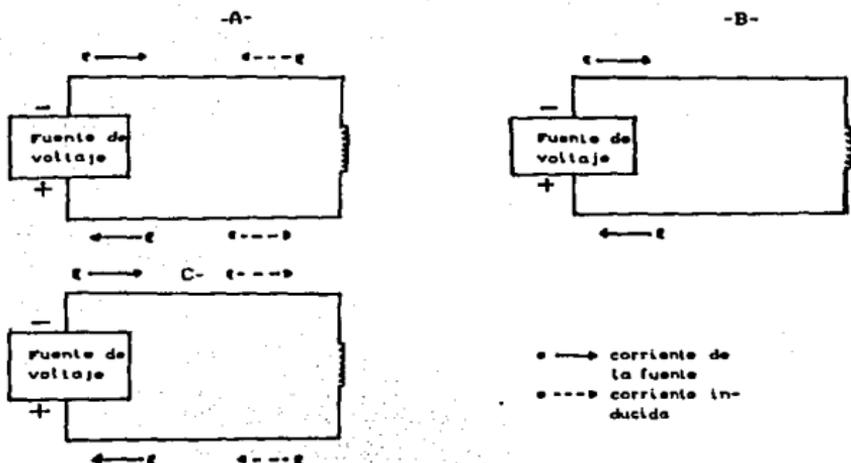


Fig. 3 Flujo de corriente en un circuito que contiene un inductor.

- A. La corriente de la fuente aumenta. La corriente inducida se opone a la de la fuente.
- B. La corriente de la fuente es constante. No existe corriente inducida.
- C. La corriente de la fuente disminuye. La corriente inducida ayuda a la corriente de la fuente.

En un circuito puramente inductivo la corriente no está en fase con el voltaje ya que va retrasada en  $90^\circ$  eléctricos. Por la ley de Lenz (la fuerza electromotriz inducida se opone siempre al cambio en la corriente de la fuente). Cuando esta se eleva, la fuerza electromotriz inducida tiende a mantener el valor de la

corriente más bajo que el que producirá el voltaje de la fuente por sí solo. En consecuencia, la elevación de la corriente de la fuente tiene lugar más tarde que el aumento del voltaje de la fuente. Cuando disminuye la corriente, la fuerza electromotriz inducida tiende a oponerse a la reducción. Por tanto, la caída de la corriente de la fuente, también tiene lugar después de la caída de voltaje de la fuente. Así, la corriente de la fuente se retrasa al voltaje en todo el ciclo.

El valor de la fuerza electromotriz inducida ( $f_{em}$ ) es mayor cuando la corriente cambia a su velocidad más alta. Si se examina la figura 4 se verá que esto ocurre cuando la corriente<sup>2</sup> pasa del cero a la posición de  $90^\circ$ . Como el voltaje de la fuente en un circuito que contiene inductancia tan sólo, es igual y opuesta a la fuerza electromotriz inducida, el voltaje de la fuente se encuentra en un máximo valor positivo en la misma posición de  $90^\circ$ . Nótese que las curvas positiva y negativa son iguales y, por lo tanto, se neutralizan. En un circuito como ese, la energía eléctrica sólo se trasforma en energía magnética en el inductor, y de nuevo vuelve a convertirse en energía eléctrica. Así, no se consume potencia.

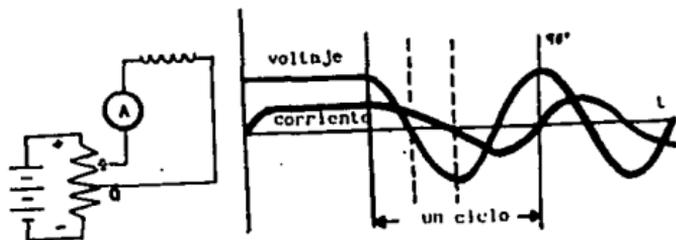


Fig. 4. Defase en atraso de la corriente respecto al voltaje.

La forma vectorial de representar el desfase se indica a continuación:

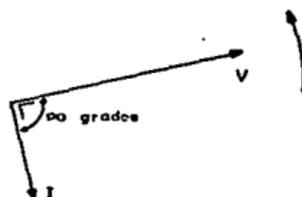


Fig. 5. Diagrama del vector de un circuito inductivo

En un circuito puramente inductivo, la potencia activa es nula, dado que:

$$\text{Factor de potencia} = \text{Potencia real} / \text{potencia aparente}$$

la potencia real es cero, por lo tanto, el factor de potencia también tiene que ser cero, por lo que no existe un consumo de energía a pesar de que la corriente ha fluido. La inductancia consume potencia reactiva, usualmente expresada en Voltz-Amperes reactivos o VAR.

Un circuito inductivo puro no existe en la práctica, los alambres conductores de la bobina tienen una cierta resistencia y hay pérdidas en el circuito magnético. Sin embargo, puede decirse que la inductancia consume una pequeña cantidad de energía activa. Dado que la corriente alterna que pasa por un inductor encuentra la oposición de la resistencia y de la contraelectromotriz inducida, la oposición total al flujo de una corriente alterna se la conoce como impedancia (Z).

Por lo tanto la ley de ohm queda modificada de la forma siguiente:

sustituyendo la impedancia (Z) por la resistencia (R) tenemos:

$$I = V / Z \quad V = I \times Z \quad Z = V / I$$

Donde I representa la corriente (en amperios), V es la fuerza electromotriz (en voltios) y Z es la impedancia (en ohmios).

La presencia de inductor en un circuito origina una fuerza contraelectromotriz que se opone, además, al flujo de la corriente. Bajo estas condiciones, la impedancia del circuito es mayor que su propia resistencia.

El factor que hace que la impedancia Z es más grande que la resistencia R en un circuito de c-a. la llamamos reactancia inductiva (XL), la reactancia inductiva, que aumenta la impedancia, también tiene al ohmio como su unidad.

La reactancia inductiva depende de la magnitud del voltaje inducido. Este voltaje, a su vez, depende de dos factores: la inductancia del circuito (L) y el grado de frecuencia (f) con que cambia la corriente (y, por lo tanto, el campo magnético).

La fórmula de la reactancia inductiva es:

$$X_L = 2\pi fL$$

Donde XL es la reactancia inductiva en ohms, f es la frecuencia en ciclos por segundo o heris, L es la inductancia en henrios. El factor 2π es necesario para expresar el resultado en ohmios.

Si suponemos que un circuito teórico sólo tiene inductancia, podemos sustituir la reactancia inductiva (XL) por la impedancia (Z) en las fórmulas que establece la ley de ohm, tenemos:

$$I = V/NL$$

$$V = I \cdot NL$$

$$NL = V/I$$

Los inductores como las resistencias, se pueden conectar en circuitos en serie, en paralelo, o mixtas. La inductancia total de varios inductores conectados en serie (siempre que el campo magnético de un inductor no pueda actuar sobre las vueltas de otro) es igual a las sumas de las inductancias de los inductores individuales. Entonces:

$$L_{total} = L_1 + L_2 + \dots + L_n$$

Si se conectan en paralelo dos o más inductores (siempre que no exista interacción o acoplamiento, de sus campos magnéticos) podemos hallar la inductancia total mediante la fórmula siguiente:

$$1/L_{total} = 1/L_1 + 1/L_2 + \dots + 1/L_n$$

### 1.3 ELEMENTO CAPACITIVO

Los electrones más exteriores de un conductor se sostienen con poca firmeza y se separan con facilidad. Por otra parte, los aisladores o dieléctricos, tienen sus electrones unidos con más fuerza. Si se coloca un dieléctrico entre dos conductores (fig.6), se forme un capacitor.

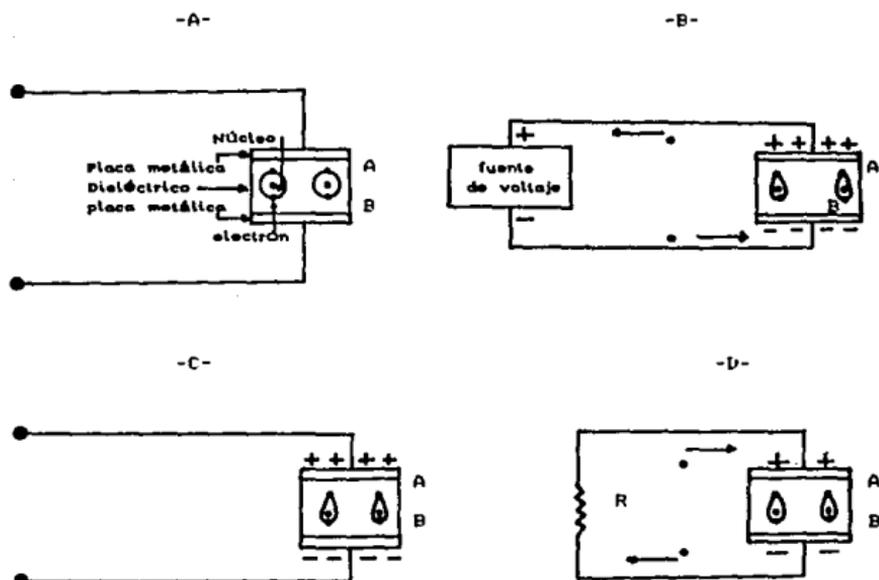


Fig. 4 A capacitor descargado  
 B carga del capacitor  
 C Fuente de voltaje desconectada, el capacitor  
 rellena su carga  
 D Descarga del capacitor

Cuando se carga el capacitor, se almacena energía eléctrica de la fuente de voltaje en el campo electrostático del dieléctrico. Al descargarse el capacitor, la energía de este campo electrostático proporciona la fuerza electromotriz que envía corriente que fluye por el circuito. La propiedad de un capacitor de almacenar energía eléctrica en esta forma, se le llama capacitancia, y el símbolo que lo representa es C.

La unidad de capacitancia es el faradio (F). El faradio puede

desarrolla una fuerza electromotriz opuesta cuando se almacena un coulombio de energía eléctrica en el campo electrostático del capacitor o del circuito cuando se aplica una tensión de 1 voltio. Si el capacitor tuviera una capacidad de un faradio, un cambio de un voltio en el potencial de la fuente, haría que las cargas de la placa aumentase o disminuyese en un coulombio.

Como un coulombio por segundo es igual a un amperio, el cambio de un voltio por segundo haría fluir un amperio por el circuito.

Si se sustituye la fuente de c-c por otra de c-a, surge una situación diferente. Cuando el voltaje se eleva desde cero hasta su máximo valor positivo, la corriente fluye desde la fuente hacia el capacitor, estableciendo una fuerza contraelectromotriz a través de sus placas. Cuando el voltaje de la fuente comienza a disminuir, esta fuerza contraelectromotriz envía de regreso a la corriente desde el capacitor hacia la fuente.

Continuación el voltaje de la fuente invierte su dirección y se eleva hasta su máximo valor negativo. Ahora, la corriente puesta en movimiento por la fuerza contraelectromotriz y la que procede de la fuente fluyen en la misma dirección. Como resultado, las corrientes fluyen por el circuito hacia el capacitor, desarrollando una nueva fuerza contraelectromotriz a través de sus placas (aunque en dirección opuesta a la fuerza contraelectromotriz original). Cuando disminuye el voltaje de la fuente desde su máximo valor negativo, la fuerza contraelectromotriz envía de regreso a la corriente del capacitor hacia la fuente. La corriente fluye a través del circuito, (exceptuando el dieléctrico del capacitor). Entonces se repite todo el ciclo.

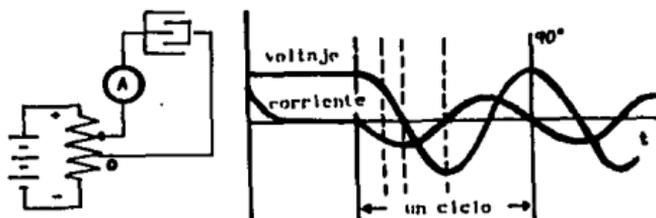


fig. 7 Efecto de la capacitancia en el voltaje y la corriente.

La figura 7 muestra el efecto del capacitor sobre la relación de fase, desde la posición de  $0^\circ$  hasta la de  $90^\circ$ , el voltaje de la fuente esta aumentando en grado siempre creciente. En los  $90^\circ$ , esta elevación, se detiene. De aquí, la corriente cae en forma gradual desde su máximo valor positivo hasta 0 en el punto  $90^\circ$ . Entre tanto, el capacitor se ha cargado por completo y la fuerza contraelectromotriz (fcm) ha alcanzado su valor máximo.

Ahora, el voltaje de la fuente comienza a bajar. Como la fuerza contraelectromotriz resulta más alta que el voltaje de la fuente, comienza a fluir corriente desde el capacitor hacia aquella como lo indica la curva de corriente negativa de la figura 7. En el punto de  $180^\circ$ , el voltaje de la fuente, cae hasta cero, otra vez,

La corriente alcanza su valor máximo negativo. Sin embargo, el capacitor se ha descargado y la fuerza contraelectromotriz decrece hasta cero.

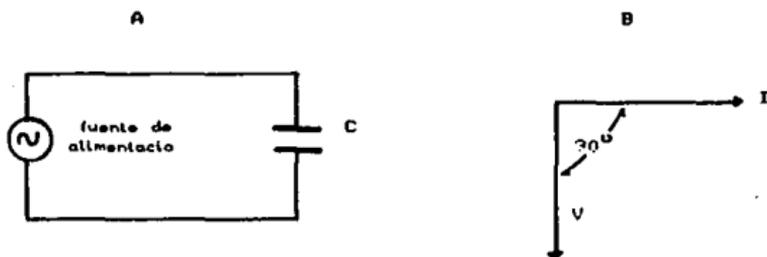
Ahora, el voltaje de la fuente cambia su dirección y continúa elevándose, en grado siempre decreciente, y la corriente comienza a disminuir desde su máximo valor negativo hacia cero. Mientras tanto, el capacitor se ha cargado de nuevo (esta vez, en dirección opuesta a la carga original) y la fuerza contraelectromotriz aumenta una vez más.

En la marca de  $270^\circ$ , cesa el aumento del voltaje de la fuente y la corriente llega a cero. Cuando comienza a bajar el voltaje de la fuente, la fuerza contraelectromotriz inicia el flujo de corriente en la dirección opuesta (positiva) hasta que esta corriente alcanza su máximo valor positivo en la marca de los  $360^\circ$ . Entonces, comienza el ciclo completo una vez más.

Examinando la figura 7, se verá que el efecto de la capacitancia es el hacer que la corriente se adelante  $90^\circ$  con respecto al voltaje de la corriente, lo que es lo mismo, hacer que el voltaje de ésta se retrase a la corriente en  $90^\circ$ . En los circuitos prácticos, a causa de la presencia de la resistencia, la corriente se adelante al voltaje en valor menor de  $90^\circ$ .

El diagrama vectorial de un circuito de c.a. teóricamente sólo contiene capacitancia, se muestra en la figura 8. (Como en el caso del diagrama vectorial que aparece en la figura 5-B la longitud del vector voltaje (V) es independiente de la longitud del vector corriente (I); la longitud de cada uno depende de la escala que se seleccione para el mismo y las características propias del capacitor. En un circuito puramente capacitivo, no existe consumo

de energía aun si hay una corriente circulando. (la potencia real es cero) . esto es por que en un ángulo de  $90^\circ$  de  $V$  con respecto a  $I$ . ese circuito tiene un factor de potencia de cero y por lo tanto no consume potencia. La energía eléctrica tan sólo se convierte en energía del campo electrostático a través del capacitor y se transforma, de nuevo, en energía eléctrica.



(fig. 8 A. Circuito de c-a que sólo contiene capacitancia.

B. Diagrama vectorial que muestra la relación de fase entre la corriente y el voltaje en este circuito

A causa de la fuerza contraelectromotriz, aumenta la oposición al flujo de la corriente en un circuito mediante un factor que se conoce como reactancia capacitiva ( $X_c$ ) y sus unidades son los ohms.

Cuando se carga un capacitor, desarrolla una fuerza contraelectromotriz a través de sus placas. Cuando más grandes son las placas del capacitor, en menor número se extiende la carga (es decir, el número de electrones). o sea, que la fuerza contraelectromotriz se hace más pequeña. Pero mientras más baja sea la fuerza contraelectromotriz, más pequeña será la reactancia

capacitiva. De aquí que cuando más grandes son las placas del capacitor (o, lo que es lo mismo, mayor su capacitancia), menor será su reactancia capacitiva.

Un capacitor en c-c tiene una reactancia capacitiva infinita. Pero en c-a cuando más sea la alternación de la corriente, es decir, cuando más elevada sea la frecuencia, menor será la fuerza contraelectromotriz y, por lo tanto, menor será la reactancia capacitiva del capacitor. de acuerdo a lo anterior podemos decir que la reactancia capacitiva es inversamente proporcional a la capacitancia del capacitor y a la frecuencia de la corriente. esta relación se puede expresar en la fórmula siguiente.

$$X_c = 1 / 2\pi f C$$

En un circuito puramente capacitivo podemos sustituir la reactancia capacitiva ( $X_c$ ) por la impedancia ( $Z$ ) en la fórmula de la ley de Ohm para los circuito de c-a.

Entonces:

$$I = V / Z$$

$$Z = V / I$$

$$V = I \times Z$$

$$I = V / X_c$$

$$X_c = V / I$$

$$V = I \times X_c$$

84997220 007

POTENCIA

## 2.1 CALCULO DE LA POTENCIA

Una de las definiciones de potencia puede ser el trabajo realizado por un julio en un segundo.

También se conoce como velocidad a la cual se utiliza la energía para producir trabajo, la razón a la que se efectúa trabajo, la velocidad a la que transforma la energía eléctrica a otra forma de energía, tales como calor, luz, radiación, sonido, trabajo mecánico, energía potencial en cualquier forma o cualquier combinación de cualesquiera de las formas de energía.

En cualquier circuito, la potencia eléctrica que se consume en cualquier instante, es igual al producto del voltaje y la corriente en ese momento por lo tanto tenemos los siguientes valores instantáneos:

$$\text{Valor instantáneo de tensión } v(t) = V_m \sin \omega t \quad (2.1)$$

donde  $V_m$  es el valor pico de tensión y  $\omega$  es igual  $2\pi f$  (siendo  $f$  la frecuencia de la señal de tensión); El valor instantáneo de la misma se obtiene evaluando a  $v(t)$  en un instante dado  $p$  es decir:

$$v = V_m \sin p \quad (2.2)$$

$$\text{Valor instantáneo de corriente } i(t) = I_m \sin (\omega t - \theta) \quad (2.3)$$

donde  $I_m$  es el valor pico de corriente; entonces el valor instantáneo de la misma es:

$$i = I_m \sin (p - \theta) \quad (2.4)$$

donde  $\theta$  es el ángulo que hay entre la corriente y la tensión conocida también como ángulo de carga.

Potencia instantánea  $p=vi$  (2.5)

Potencia promedio (activa)  $P$  se define como el promedio de la potencia instantánea  $p$ . Esta potencia puede expresarse en términos de la tensión  $v(t)$  y de la corriente  $i(t)$  como sigue:

$$P = 1/T \int_0^T v(t) i(t) dt \quad (2.6)$$

En un sistema senoidal, al sustituirse  $v(t)$  en  $i(t)$  en la ecuación (2.6) se obtiene lo siguiente:

$$P = \frac{V_m I_m}{2} \cos \theta = \frac{\sqrt{2} V_{ef} \sqrt{2} I_{ef}}{2} \cos \theta \quad (2.7)$$

tenemos que  $V_m = \sqrt{2} V_{ef}$

$$P = V_{ef} I_{ef} \cos \theta$$

Tomando a  $V$  como  $V$  eficaz y  $I$  como corriente eficaz tenemos:

$$P = VI \cos \theta$$

Potencia reactiva ( $Q$ ) en un sistema senoidal esta dado por:

$$Q = \frac{V_m I_m}{2} \sin \theta \quad (2.8)$$

Potencia aparente ( $S$ ), siendo  $V$  el valor eficaz de tensión e  $I$  el valor eficaz de corriente; se define entonces a la potencia aparente como el producto de estos valores eficaces:

$$S = V I$$

Tomando en cuenta las ecuaciones 2.7 y 2.8, S también se representa como:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (2.10)$$

y en forma vectorial:

$$S = P i + Q j \quad (2.11)$$

donde  $i$  y  $j$  son vectores unitarios en sentido de ejes perpendiculares.

La interpretación de las potencias antes mencionadas en forma física en un sistema senoidal nos indica:

La potencia activa de acuerdo a la ecuación 2.6, es el valor promedio de la potencia instantánea  $p$ .

Sin embargo, partiendo de la ecuación 2.5 y aplicando las ecuaciones 2.2 y 2.4, la potencia activa puede escribirse de la siguiente forma:

$$P = V_m I_m \cos \theta - V_m I_m \cos (2\theta - \theta) \quad (2.12)$$

En las figuras 9, 10, 11 y 12 muestran el comportamiento en forma gráfica de la potencia instantánea  $p$  en un periodo  $T$  de la línea.

Analizando la ecuación 2.12, puede caracterizarse a la potencia activa  $P$  como la componente de corriente directa CD de  $p$ . Entonces, la naturaleza física de  $P$  puede definirse como la potencia constante que se toma del sistema de corriente alterna CA en el caso de una carga, o lo cual se entrega al sistema de CA en el caso de una fuente.

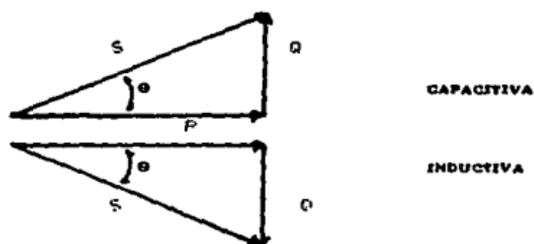
La potencia aparente no sólo se representa con la ecuación 2.10, puede también representarse en forma compleja como:

$$S = P i + Q j \quad (2.17)$$

donde:

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

De las ecuaciones de potencia podemos determinar una relación trigonométrica llamada triángulo de potencias donde:



La ecuación 2.17 nos permite encontrar la interpretación física de la potencia aparente. Ya que la potencia activa  $P$  puede analizarse como la potencia de  $CD$  de la potencia instantánea; y  $Q$  como la componente de  $CA$  de dicha potencia durante un periodo.

La ecuación de la potencia instantánea se aplica con independencia de que la corriente sea continua o alterna. Si la corriente continua es constante, la potencia también será constante.

$$P = VI \quad \text{en corriente continua o directa}$$

Pero si la corriente es alterna, la potencia variará, de un instante a otro con el cambio de la corriente. La ecuación 2.6 no lo indica. Así, si examinamos la gráfica de la figura 9, nos muestra la relación entre el voltaje, la corriente y la potencia

en un circuito de corriente alterna donde la carga es 100% resistiva. Nota que la curva de potencia es el resultado del producto de los valores instantáneos del voltaje y de la corriente. Cuando el voltaje y la corriente son positivos, la potencia también es positiva ( $i \times v = +$ ). Cuando el voltaje y la corriente son negativos, la potencia también es positiva ( $-i \times -v = +$ ), notando que la corriente y el voltaje están en fase.

La figura 10 muestra una gráfica que describe la relación entre la corriente y el voltaje en un circuito fuera de fase. Multiplicando los valores instantáneos de la corriente y el voltaje, podemos obtener la curva de la potencia.

En los primeros  $90^\circ$  del ciclo, el voltaje es positivo y la corriente es negativa ( $i \times v = -$ ). En consecuencia, la potencia es negativa. **ESTA SIGNIFICA QUE LA ENERGIA ELECTRICA FLUYE DEL CIRCUITO HACIA LA FUENTE.**

Durante los siguientes  $90^\circ$  del ciclo, la corriente y el voltaje son positivos. Por lo tanto la potencia también es positiva. **Y LA CORRIENTE FLUYE DE LA FUENTE HACIA EL CIRCUITO.**

Para los siguientes  $90^\circ$  del ciclo, la corriente es positiva y el voltaje negativo. La potencia es negativa y la energía fluye de nuevo del circuito hacia la fuente. Durante los últimos  $90^\circ$  del ciclo, la corriente y el voltaje son negativos. Entonces, la potencia es positiva y la energía fluye una vez más, de la fuente hacia el circuito.

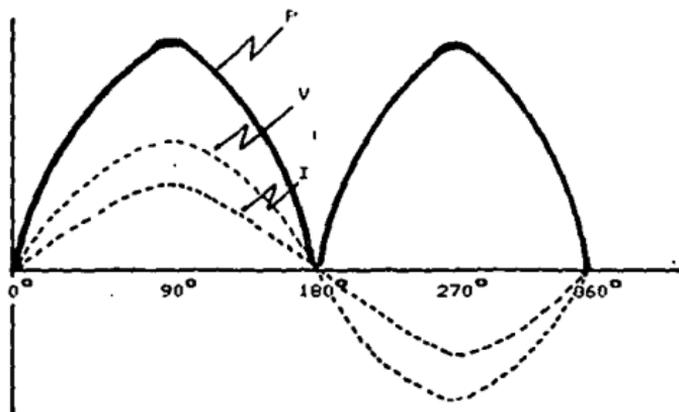


Figura 10 Gráfico que muestra la relación entre V, I y P

El examen de la gráfica 10, demuestra la potencia positiva es igual y opuesta a la potencia negativa. Como resultado, se neutralizan y el valor neto es cero. Es decir el circuito no consume o dicipa potencia. La energía eléctrica tan sólo fluye de la fuente hacia el circuito y regresa otra vez. Nótese, sin embargo, que esta condición se mantiene únicamente cuando el ángulo de fase es de  $90^\circ$ .

En la figura de la gráfica 11 tiene un ángulo de fase de  $30^\circ$ . Examinándola tenemos que la potencia es negativa sólo los intervalos entre  $0^\circ$  y  $30^\circ$  y entre  $180^\circ$  y  $210^\circ$ . Durante el resto del ciclo, la potencia es positiva. Así, la potencia media no es cero, como en el caso de un circuito donde el ángulo de fase es de  $90^\circ$ , mostrada en la figura 12 donde se refleja la potencia para un circuito inductivo y capacitivo. Sin embargo, es menor que la potencia media que dicipa un circuito semejante en el que la

corriente y el voltaje se encuentran en fase.

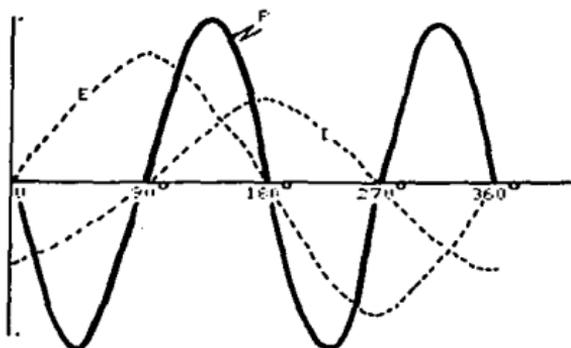


Figura 10 Gráfica que muestra la relación entre el voltaje, la corriente y la potencia con un desfase de  $90$  grados.

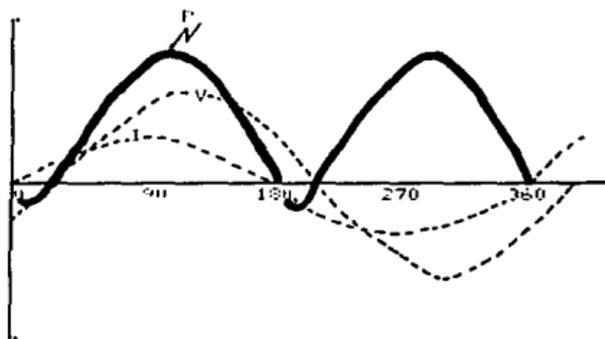


Figura 11 Gráfica que muestra la relación entre el voltaje, corriente y potencia cuando el voltaje y la corriente tienen una diferencia de fase de  $90$  grados

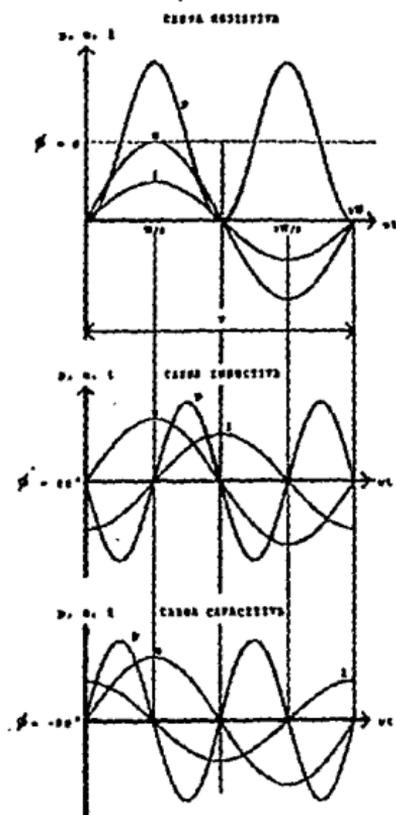


Figura 12 Relación de la potencia voltaje y corriente para un circuito resistivo, inductivo y capacitivo puro.

## 2.2 MEDICION DE LA POTENCIA

La inversión y los costos de producción para electricidad dependen de la cantidad de energía usada, pero también los niveles de potencia demandada por el consumidor. En suma, para medir la cantidad de energía, las compañías abastecedoras de electricidad tienen que medir el nivel de potencia en el cual esta energía es consumida.

Aí que hay que considerar solamente cargas impuestas durante períodos largos, las cuales son aquellas que pueden modificar el equilibrio termodinámico de la instalación, la determinación de la demanda de potencia se basa en un período de medición de 15 minutos.

Al hablar de potencia en corriente alterna se entiende la potencia activa, aunque existen tres tipos de potencia fundamentales en un sistema monofásico, y así tenemos:

### MEDIDA DE LA POTENCIA CA. MONOFASICA

potencia activa  $P=VI \cos \phi$  (Watts) W

potencia reactiva  $Q=VI \sin \phi$  (vares) Varr

potencia aparente  $S=VI$  (Voltamperios) VA

De las potencias anteriores la más importante es la activa, ya que es la que realmente se transforma en potencia mecánica, que es la que realiza un trabajo.

Para medir la potencia aparente que se consume en un circuito, es igual al producto de la corriente y el voltaje (eficaces). Se obtiene conectando un voltímetro y un amperímetro para indicar

ator valores, y calcular los (VA). por ejemplo: si deseamos determinar la potencia aparente que consume una carga R de un circuito, se pueden conectar los medidores como se indican en la figura 13. Se puede sustituir el amperímetro de paso por un amperímetro de gancho.

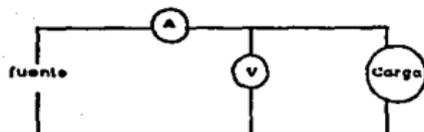
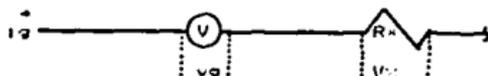


Figura 13. Conexión del Voltímetro y Amperímetro.

#### Voltímetro

Si los valores de voltaje y de corriente de la línea son muy grandes, lo cual provoca que no podamos utilizar los instrumentos, se puede ampliar el rango de la escala del instrumento de medición utilizando resistencias de acoplamiento o patron de la siguiente forma.



Del circuito anterior tenemos que:

$$V = V_g + V_x$$

$$V = I_q \times g + I_q \times R_x \quad \text{siendo } g \text{ la resistencia interna } (\Omega)$$

$$R_x = \frac{V - (I_q \times g)}{I_q} = \frac{V - v_g}{I_q} = \frac{V}{I_q} - g \left[ \frac{V}{v_g} - 1 \right]$$

- $v_g$  es la tensión que nos da desviación de la aguja a final de la escala (campo de medida de tensión).  
 $i_g$  intensidad máxima que puede soportar las bobinas del aparato y que nos darán desviación al final de escala (campo de medida de intensidad).  
 $r$  resistencia interna del aparato.

Cualquiera de las expresiones es válida y utilizaremos la que más nos convenga según los datos de partida.

Ejemplo:

Calcular la resistencia que se debe conectar en serie con un milivoltímetro de  $i_g = 400$  micro amperes y  $v_g = 100$  mV para transformarlo en voltímetro de 150 V.

$$R = V - v_g / i_g$$

$$R = (150 - 0,1) / 400 \times 10^{-6} = 374.750 \Omega$$

Se entiende que el milivoltímetro es para corriente alterna, este sistema puede trabajar hasta 1.000 V. Para valores superiores se utilizan transformadores llamados transformadores de potencia (TP). El TP nos reducen la tensión de la red a valores inferiores, más asequibles para poder medir con voltímetros de campo de medidas relativamente bajo figura 14.

Ejemplo:

Se tiene que medir una tensión del orden de 15 KV con un voltímetro de 150 V. El TP mostrado en la figura 14. es alimentado en un primario (P) a una tensión del orden  $V_1$  y en su secundario (S) se inducen del orden de  $V_2$ . luego con un voltímetro de alterna de 0 a  $V_2$  podremos medir tensiones entre 0 y  $V_1$ . ya que siempre se mantendrá la misma relación de transformación ( $rt$ ) por lo tanto tenemos:

$$rt = V_1/V_2$$

sustituyendo:

$$rt = 15,000/150 = 100 \text{ V}$$

lo que quiere decir que por cada voltio que marque el voltímetro tiene que haber 100 V en la línea principal. luego, si el voltímetro nos indica  $V_r = 25 \text{ V}$ . la tensión real de la línea  $V_L$  sería:

$$V_L = rt \times V_r = 100 \times 25 = 2.500 \text{ V ca.}$$

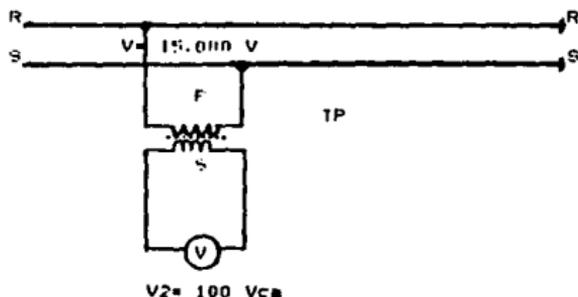


Figura 14. Conexión y representación del TP

## Amperímetro

Al cambiar el campo de medida de un amperímetro en corriente alterna (ca) se tienen que conectar en paralelo (Shunt) una resistencia  $S$  de valor adecuado que nos desvíe la intensidad ( $I_s$ ) que no admita el equipo interno del aparato cuyo campo y medida se trata de ampliar (19). de forma que entre los dos pasará la intensidad total  $I$  a medir. en la figura 15 tenemos el esquema de conexión necesario para aumentar el campo de medida de un amperímetro.

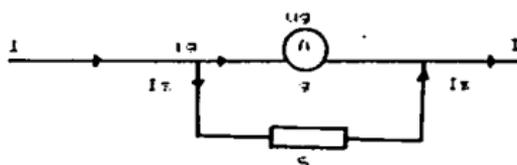


Figura 15 Ampliación del campo de medida del amperímetro

Para calcular el valor del Shunt necesario seguiremos este razonamiento:

$$I = I_1 + I_2$$

$$V = V_g = I_1 \cdot S = I_2 \cdot R$$

$$S = I_2 \cdot R / I_1 =$$

$$S = I_2 \cdot R / I - I_2 = R / (I/I_1) - 1 = R / m - 1$$

mas  $I/I_1$  factor de multiplicación

Ejemplo:

Calcular el Shunt necesario para transformar un miliamperímetro de características:  $i_g = 400 \mu\text{A}$ ,  $v_g = 100 \text{ mV}$ , en amperios de campo de medida de 15 A.

$$S = v_g / I - i_g$$

$$S = 100 \times 10^{-3} / 15 - 400 \times 10^{-6}$$

$$S = 6.6 \times 10^{-3} = 0.0066 \Omega$$

De la ecuación podemos determinar que si queremos aumentar el campo del miliamperímetro la resistencia Shunt tiende a reducirse. Para amperímetros de corriente alterna y campos de medidas elevados, se utilizan los transformadores de intensidad, cuya medición es semejante a los transformadores de potencia PT.

Los transformadores de intensidad figura 16 suelen llevar, además de las relaciones interiores en los bornes, un orificio central de forma que pasando un conductor por su interior éste hace de primario y se obtiene otra relación de transformación según el número de vueltas que se le dé. En el transformador de la figura 16 (IC), el secundario es de 5 A y el primario de 0. 20. 50 A.

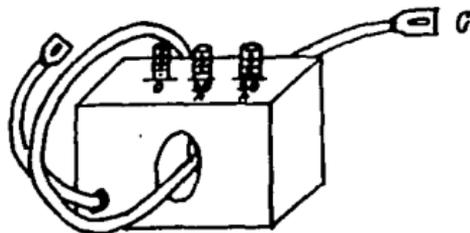


Figura 16. Transformador de intensidad

del transformador de corriente. Si tenemos el conductor C por el orificio central, tendremos que éste hace de primario con los siguientes campos:

1 N            300 A

2 N            150 A

3 N            100 A

El esquema de montaje de un amperímetro con transformador de intensidad es el de la figura 16 donde tendremos que la medida real será:

$$I_1 = I_a \times r_i$$

ya que  $r_i$  es la relación de transformación de intensidad.

$$r_i = I_1 / I_2$$

Si damos valores a  $I_1$  e  $I_2$  tendremos, por ejemplo:

$$\begin{array}{l} I_1 = 100 \text{ A} \\ I_2 = 5 \text{ A} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} r_i = I_1 / I_2 = 100 / 5 = 20 \end{array} \right.$$

Supongamos que el amperímetro nos da una lectura de  $I_a = 3 \text{ A}$ , la intensidad  $I$  que circulará por la línea será:

$$I = r_i \cdot I_a = 20 \times 3 = 60$$

Esto quiere decir que el amperímetro nos indicará un valor veinte veces menor del real de línea.

\* Para medir la potencia activa en un línea monofásica se utiliza el watímetro (vatímetro). Y mide el trabajo realizado por un julio en un segundo. Es una máquina de multiplicar y realizar el producto escalar del vector tensión por el vector intensidad; es decir:

$$P = VI \cos \phi$$

La representación vectorial está en la figura 17. En el caso de que se trate de corriente continua, el producto escalar es igual al producto de los módulos, ya que la tensión y la corriente están en fase.

Los watímetros son los aparatos típicos electrodinámicos constituidos normalmente por dos bobinas fijas y una móvil. Las bobinas fijas ( $R_f$ ) son las que van en serie y forman el circuito de intensidad.

Elas entre sí pueden ir en serie o en paralelo, dando posibilidad a dos campos de medida amperimétricos caso de la figura 18. La bobina móvil ( $I_m$ ) es la de tensión, construida con hilo muy fino (poco peso) y alimentado a través de las espiras antagonistas ( $e$ ). Las bobinas fijas pueden tener núcleo de aire o de hierro ( $N$ ), lo que proporciona una valor de alta sensibilidad.

Un modelo de Watímetro electrodinámico lo tenemos en la figura 19 en el que están hechas sus indicaciones anteriores en su sección. La ampliación del campo de medición se consigue con resistencias adicionales exteriores, calculadas de igual forma que para los voltímetros.

En corriente alterna, para tensiones superiores a los 500 Vca e intensidades superiores a la puesta en paralelo de las bobinas amperimétricas, se utilizan transformadores de medida, de tensión e

Intensidad respectivamente .

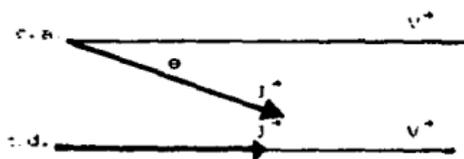


Figura 17 representación vectorial de V e I

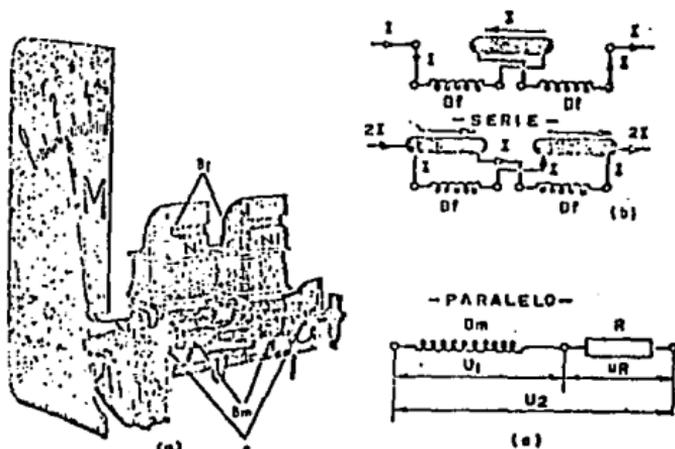


Figura 18 Wattmetro a) Sección. b) bobina de intensidad. c) bobina de tensión

La conexión de un Wattmetro con transformadores es la indicada en la figura 17. En el esquema se puede observar que la bobina voltimétrica lleva conexión equivalente a la del voltímetro, y la amperimétrica, en forma idéntica a la del amperímetro.

El transformador de tensión (PI) va conectado en paralelo con la red, y el de intensidad (II) va en serie con la red.

Para obtener la potencia real que está circulando por el sistema, debemos tener en cuenta las relaciones de transformación. Así, tendremos:

$$r_t = V_1/V_2$$

$$r_i = I_1/I_2$$

Si la lectura del Wattmetro nos indica P Watts, la potencia verdadera de la línea  $P_L$  será:

$$P_L = r_t \times r_i \times P \text{ del medidor}$$

En el caso de tener un Wattmetro portátil se realizan las mismas conexiones, normalmente estos instrumentos tienen una extensión múltiple, siendo el caso de la figura 19.

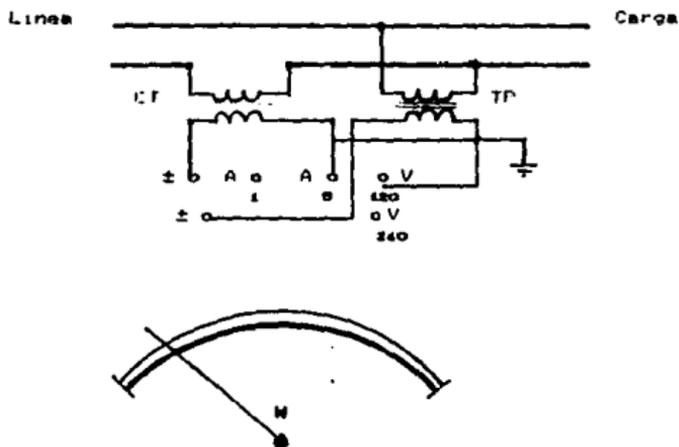


figura 19 Wattmetro portátil tipo 2041 YEW

Para el Wattmetro 2041 su extensión múltiple es:

Rango de voltaje	Rango múltiple	
Rango de corriente	120V	240V
1A	1	2
5A	5	10

En este caso si la lectura del Wattmetro nos indica P Watts, la potencia verdadera de la línea PL será:

$$r_t = 6600/110 \text{ V}$$

$$r_i = 50/5 \text{ A}$$

$$\text{Lectura } P = 100$$

$$\text{Rango múltiple} = 5$$

$$\text{Conexión de terminales} = 120 \text{ V. } 5 \text{ A}$$

Tenemos:

$$P_L = r_t \times r_i \times P \times \text{Rango múltiple}$$

$$P_L = 6600/110 \times 50/5 \times 100 \times 5$$

$$P_L = 300 \text{ kWatt}$$

Si se tiene tan solo un TF y el TC no, se elimina de la ecuación la  $r_i$  y se efectúa el producto.

† Valor del  $\cos. \theta$  para una sola fase.

Hemos visto previamente que el factor de potencia puede ser calculado cuando las potencias aparente y potencia real son conocidas.

El método más simple es medir la potencia (usando un Wattmetro), obtener el producto de la corriente y el voltaje. Entonces tenemos:

$$\cos \theta = P / VI = P / S$$

Otro método es usar un cosímetro o fasímetro, que de las dos formas puede llamarse. el medidor de fase tipo Brüder, es un dispositivo con dos armazones cruzados y sin acción de resorte para el indicador. El punto, asumirá una posición arbitraria (medidor) en su posición de descanso figura 20.

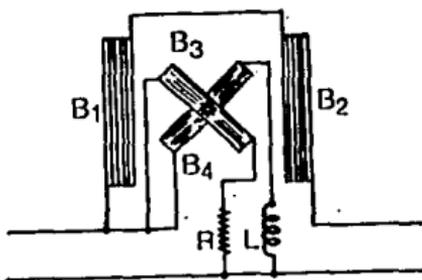


figura 20. Principio de un medidor de fase tipo Brüder

El principio de operación consisten en dos embobinados B1 y B2 fijo a través de los cuales fluye la corriente total. El flujo así creado afectará los dos embobinados móviles los cuales están montados perpendicularmente uno del otro.

El primero se alimenta a través de un circuito resistivo y el segundo a través de un circuito inductivo. Ambos están conectados al voltaje de la red. B1 y B2 creando un flujo en base con la corriente, B3 un flujo en base con el voltaje y B4 un flujo retrasado del voltaje en  $90^\circ$ . En equilibrio, la posición del brazo es una función del ángulo entre la corriente y el voltaje

por ejemplo, la escala de  $\cos \varphi$  debe aclararse que la lectura es sólo válida para una sola frecuencia, no tienen espiral antagonistas, por lo que, sin conectar, la posición de la aguja es indistinta, su escala es irregular (no uniforme) como puede verse en la figura 21.

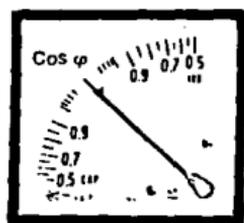
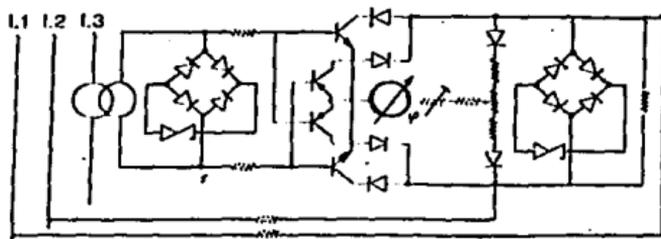


figura 21. Cosímetro de cuadro

Al utilizar un medidor de factor de potencia ( $\cos \phi$ ) tipo 2039 marca YEW, para valores de potencia grandes se utilizan transformadores de corriente (TC) y transformadores de potencia (TP) los cuales se manejan con un rango de frecuencia de 45 a 65 Hz. Su conexión se muestran en la figura 22, para obtener valores en forma directa. Y en la figura 23, utilizando transformadores.

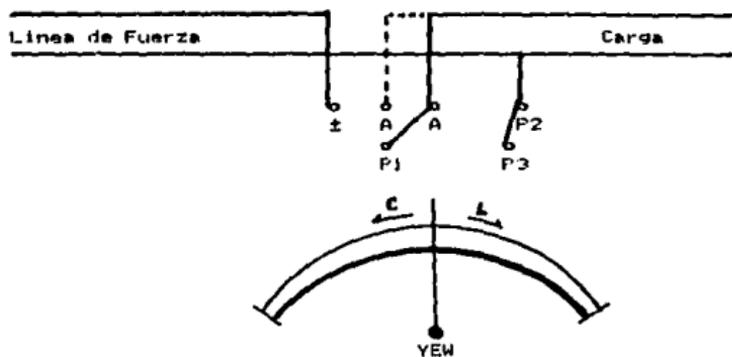


Figura 22. Conexión de un cosímetro directo a línea

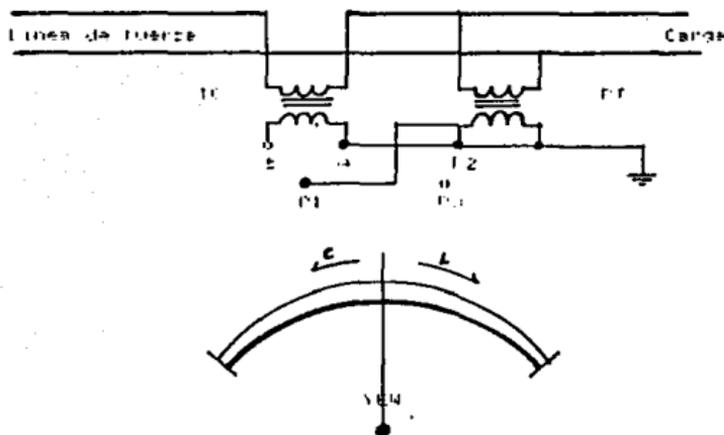


Figura 28. Conexión de un cosímetro utilizando transformadores

#### 1. Contador de energía activa (Wattímetro)

Los contadores más importantes, dada su utilización, son los de inducción, que tienen su fundamento en la reacción producida entre un electromán y un disco de aluminio al ser atravesados por las líneas de fuerza producidas por éste.

En la figura 24, se muestra un medidor de energía activa (Wattímetro). Si tiene que medir una potencia, se montara sobre un núcleo una bobina de tensión  $P_1$  de muchas espiras de hilo fino, y otra de intensidad  $P_2$  de pocas espiras de hilo grueso. Al ser recorridas por una corriente, producirán sobre el núcleo  $H$  un flujo  $\Phi$ , suma vectorial de los producidos por las bobinas de tensión e intensidad. Al atravesar el flujo  $\Phi$  el disco  $D$ , induce en el corriente de Foucault que le hacen tirar sobre su

eje E. La velocidad de giro es proporcional al flujo  $\Phi$ , y por tanto, lo es también a la tensión, a la intensidad y al ángulo de defase entre ambos. Será, pues, proporcional a la potencia activa ( $VI \cos \phi$ ) que lo atraviesa. Esta proporcionalidad se regula con el imán permanente I.

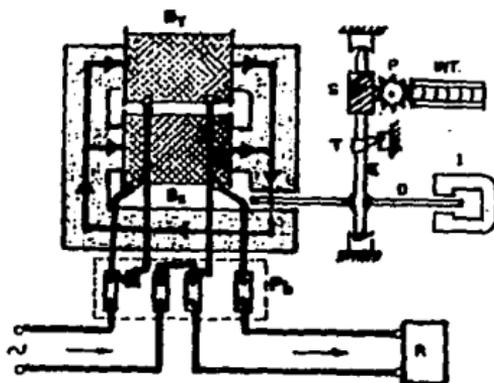


Figura 24 Contador de inducción monofásico

#### MEDIDA DE POTENCIA EN CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA

Salvo en el caso de pequeños receptores, El suministro de energía se hace con redes trifásicas, cuya potencia es necesario conocer. Las potencias en corriente alterna trifásicas tienen por expresiones:

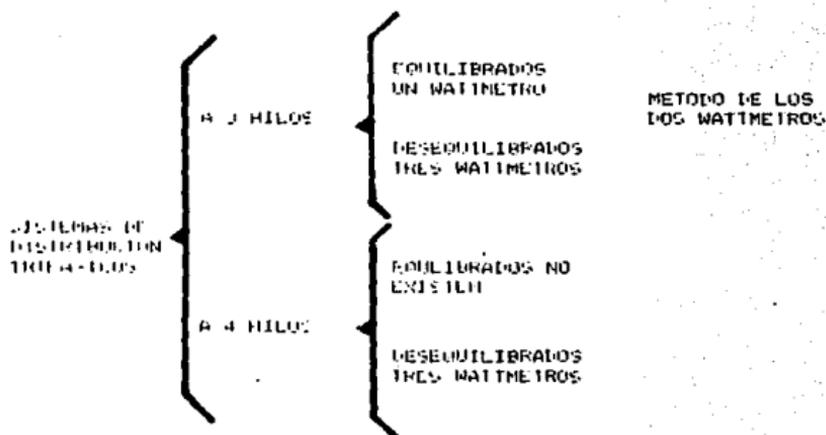
$$\text{Potencia activa } P = \sqrt{3} V I \cos \phi$$

$$\text{potencia reactiva } Q = \sqrt{3} V I \sin \phi$$

$$\text{Potencia aparente } S = \sqrt{3} V I$$

$V$  e  $I$  son las tensiones e intensidades en línea, respectivamente. Como la medida de potencia en sistemas trifásicos dependen del

tipo de red se debe considerar los distintos sistemas trifásicos de distribución, que se pueden agrupar en el siguiente cuadro:



Se dice que un sistema trifásico cuando las tensiones, intensidades y ángulos de fases son iguales en todas las fases. Un sistema trifásico será desequilibrado cuando alguno de los factores son distintos.

Medida de la potencia activa o real equilibrados es el caso de las líneas de alimentación de receptores trifásicos como motores trifásicos, estufas trifásicas, en general toda máquina trifásica.

Para medir esta potencia figura 25, se puede utilizar un Wattmetro monofásico, auxiliado de dos resistencias adicionales  $R_a$  cuyo

valor se aigual a la resistencia total del circuito Wattimetrico del Wattmetro. La potencia del sistema será la que indique el Wattmetro multiplicada por las tres fases.

$$P_t = P \times 3$$

Es muy frecuente que el conjunto Wattmetro-resistencias se dé montado sobre una misma base y la escala vaya multiplicada por tres. En ese caso, la lectura es directa.

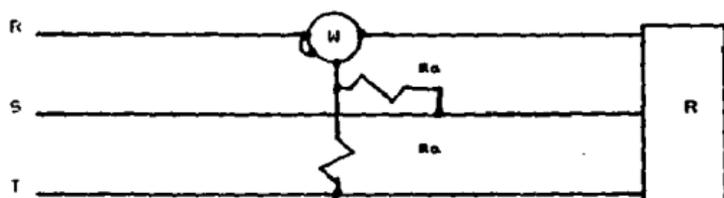


Figura 25. Medida de potencias en líneas trifásicas o tres hilos equilibradas.

Otro método es utilizando dos Wattmetros monofásicos tipo 2041 como lo indica la figura 26. La potencia total en este caso es la suma algebraica de los dos indicadores evaluándose las dos en

forma positiva, normalmente el Wattmetro dos se deflece en forma negativa y se tiene que considerar como positiva su escala.

Fig. 26. Fig. 27.

Para el caso de medición de potencia fuera del rango de los Wattmetros se utiliza el mismo método utilizado en sistemas monofásicos y su conexión se da en la figura 27.

Fig. 27. Fig. 28.  $P \times \text{rango múltiple}$

Fig. 27. Fig. 28.  $P \times \text{rango múltiple}$

Fig. 26. Fig. 27.

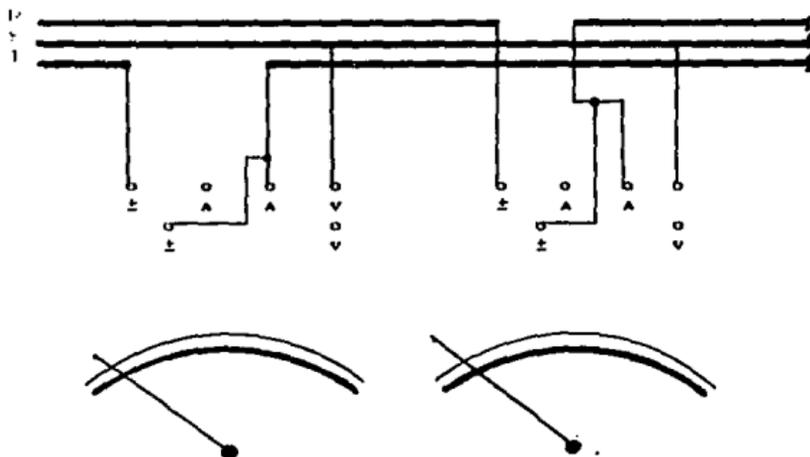


figura 26. Conexión de dos Wattmetros para sistemas trifásicos

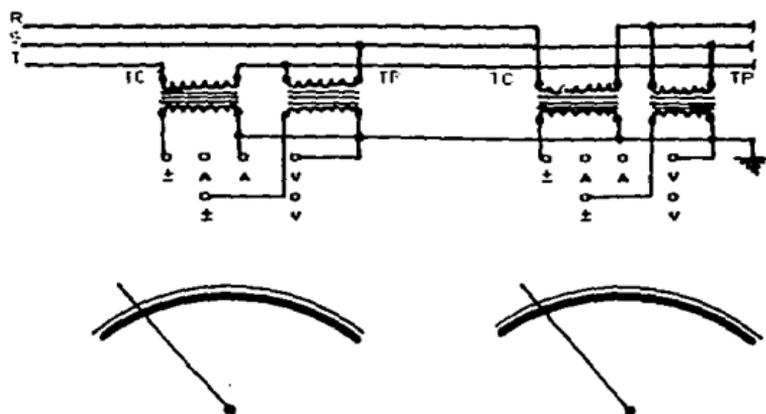


Figura 27. Método de los dos Wattmetros con transformadores

Desde el punto de vista industrial este método es correcto tanto en sistemas equilibrados como desequilibrados a tres hilos.

#### Sistemas trifásicos a tres hilos, desequilibrados.

Este caso se presenta cuando existen cargas trifásicas y monofásicas en la misma línea. Estos sistemas suelen estar equilibrados o desequilibrados o prácticamente equilibrados, en tensiones y desequilibrados en intensidades y ángulo de fase.

La medida de la potencia en esta línea se realiza con tres Wattímetros (figura 28) y la potencia total es la suma de las indicadas por cada uno de los Wattímetros.

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3$$

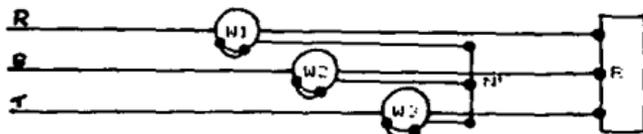


Figura 28 Medida de potencia en 3 hilos desequilibrados

Queda ahora un método muy importante, el método de los dos Wattímetros.

El principio teórico de este método se basa en la potencia total de un sistema trifásico y será la suma de las potencias que suministra cada fase:

$$P_T = P_R + P_S + P_T = V_R I_R \times V_S I_S \times V_T I_T \quad (1)$$

En un sistema trifásico a tres hilos (equilibrada o no) la suma vectorial de las intensidades de cada fase es nula:

$$I_R + I_S + I_T = 0 \quad (2)$$

Despejando de la 2 una cualquiera de las intensidades tendremos:

$$I_R = -I_S - I_T; I_S = -I_R - I_T; I_T = -I_R - I_S \quad (3)$$

Si ahora en la 1 sustituimos una de las intensidades por una cualquiera de las ecuaciones 3, por ejemplo la  $I_S$  nos quedará:

$$\begin{aligned} P_T &= V_R \times I_R + V_S (-I_R - I_T) + V_T \times I_T = \\ P_T &= V_R \times I_R - V_S \times I_R - V_S \times I_T + V_T \times I_T = \\ P_T &= \underbrace{I_R (V_R - V_S)}_{W1} + \underbrace{I_T (V_T - V_S)}_{W2} \end{aligned} \quad (4)$$

Al ir operando, nos queda la suma de los tres productos escalares

reducida a la suma de dos, de tal forma que, si conectamos de manera que cada Wattmetro realice un producto, con solo dos nos arreglaremos el sistema.

El esquema de montaje que corresponde a la expresión 4 será el de la figura 29. En él podremos observar que el Wattmetro  $W_1$  soporta el peso de la corriente  $I_a$  y su bobina de tensión está sometida a la diferencia de potencial ( $V_a - V_b$ ). El Wattmetro  $W_2$  unido al segundo producto ya que su bobina de intensidad soporta la corriente  $I_T$  y su bobina de tensión está sometida a la tensión de la red (compuesta) ( $V_T - V_b$ ).

Con este método cuando el factor de potencia es menor de 0.5 (motores y transformadores en vacío o con poca carga) uno de los Wattmetros se clava a cero y entonces se invertirá su bobina de tensión y la potencia que indica se restará de la que marque el otro, siendo la potencia total en este caso, la diferencia de lecturas.

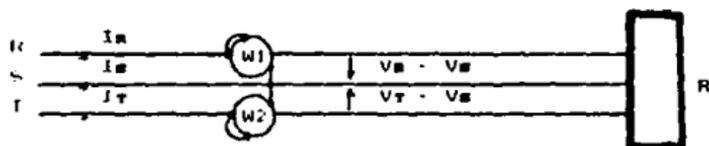


Figura 29 Método de los dos Wattímetros

\* Contadores de energía activa trifásicos a 4 hilos

Los Wattíhorímetros trifásicos tienen su principio base, idéntico a los monofásicos, pero, llevan más discos (con su correspondiente circuito magnético) solidarios del mismo eje que mueven el mismo integrador.

Se pondrá el contador adecuado al tipo de red. Si se trata de una red a tres hilos, equilibrada o no, se utilizará un contador que funciona por el método de los Wattímetros y cuya conexión está representada en la figura 29. La conexión de este contador se corresponde con el montaje del Wattmetro de la figura 29, donde la fase común es la S.

Cuando se trata de potencias elevadas, se suministra en trifásico a cuatro hilos (tre fases y un neutro), y, en este caso, el Wattíhorímetro lleva tres circuitos electromagnéticos con tres discos acoplados sobre el mismo eje.

En la figura 30, se representa la conexión del Wattíhorímetro y se corresponde con la conexión del de los Wattmetros de la figura 28.

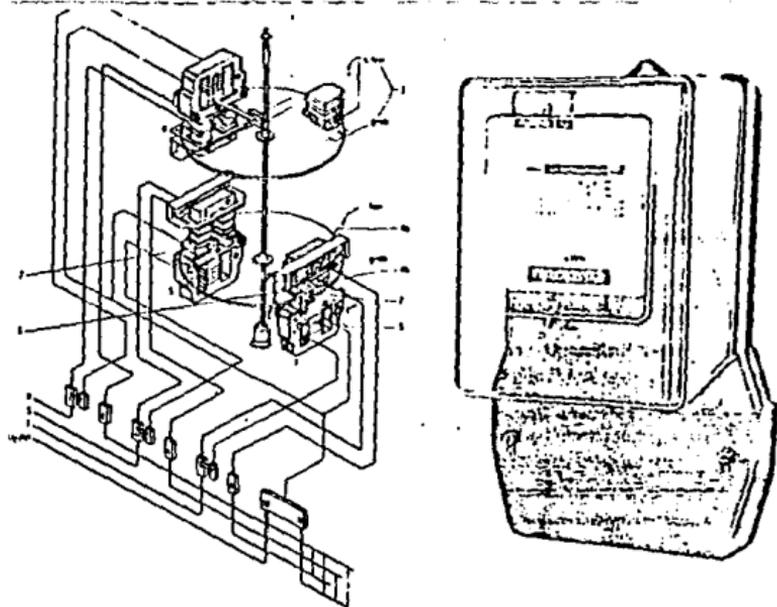


Figura 90. Contador trifásico con tres circuitos de medida (Línea trifásica a cuatro hilos).

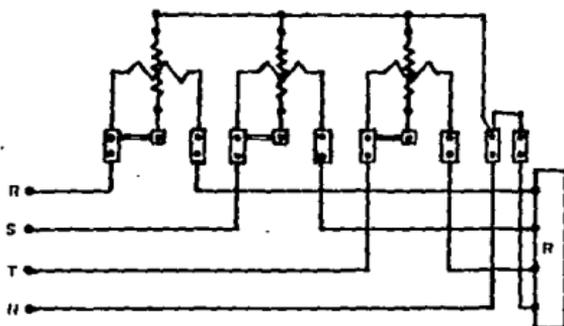


Figura 91. Medidor de potencia a cuatro hilos

Medida del factor de potencia en una instalación.

Cuando se trata de medidas en líneas trifásicas, según el tipo de éstas se necesitan unas conexiones u otras. Así:

**Líneas equilibradas a cuatro hilos.** Será suficiente con solo corrimetros monofásicos conectados como lo indica la figura 32. El ángulo de desfase medio será el de esa misma fase, pues todas son iguales.

**Líneas desequilibradas a cuatro hilos.** Se necesitará un corrimetro monofásico por fase y se calculará el valor medio del cos  $\phi$  de la línea.

**Líneas equilibradas a tres hilos.** En este caso, se utilizará corrimetros trifásicos de un equipo de medida, es decir, monofásicos con neutro artificial figura 33. El cos  $\phi$  medio es el valor medio y el de fase, ya que es un sistema equilibrado.

**Líneas desequilibradas a tres hilos.** Se utilizan para esta medida fasímetros con tres equipos de medida, como el caso de la figura 29. Los fasímetros, al estar contruidos con dos bobinas, una de tensión y otra de intensidad, tendrán unos valores máximos de una y de otra que no se podrán sobre pasar. Así, cuando un corrimetro lleve indicado en carátula 220 V, 5 A, quiere decir que se podrá utilizar en una línea de tensión 220 V, y cuyo consumo máximo sean 5 A.

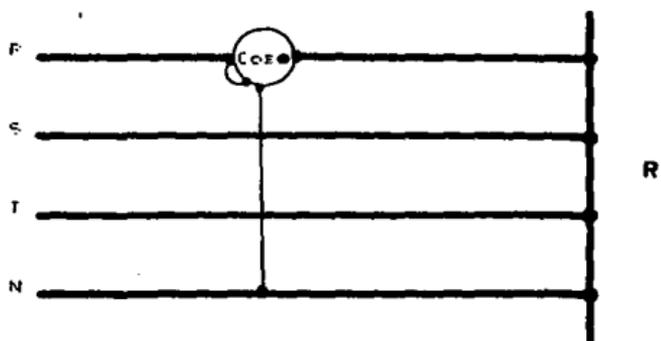


Figura 22. Medición del factor de potencia en líneas equilibradas a cuatro hilos.

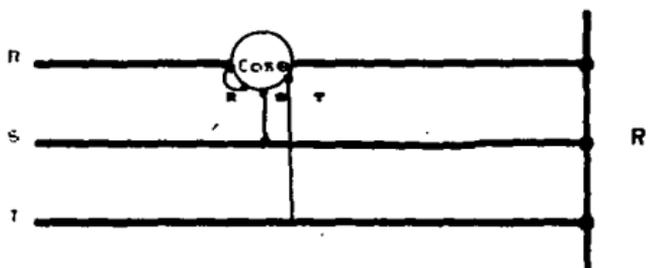


Figura 23. Medida del Factor de Potencia en líneas trifásicas a tres hilos

Al utilizar un medidor del factor de potencia tipo 2039 marca YEW para un sistema equilibrado, su forma de conexión es la indicada en la figura 34, donde son utilizadas las terminales P1, P2 y P3 en forma individual esto es una por cada fase, cortocircuitando el amperímetro interno del medidor, según la constante de multiplicidad que se maneja, para 1 A o 5 A, sus otras características son: de 60 V a 300 V,  $\cos \theta$  0.5 a 1, frecuencia de 45 a 65 Hz.

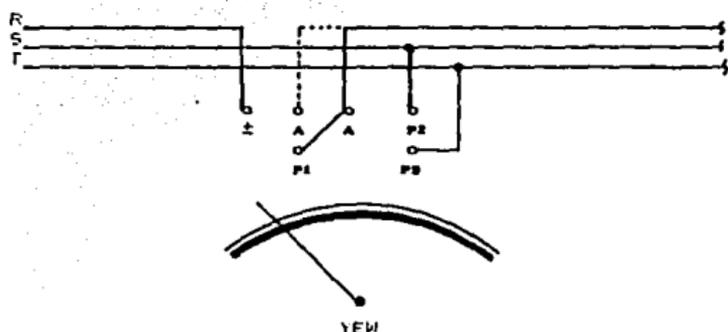


Figura 34. Conexión del medidor de Factor de Potencia 2039

Para utilizar el medidor de factor de potencia  $\cos \theta$  tipo 2039 fuera de su rango de medición se utilizan dos transformadores de potencia PT y un transformador de corriente TC como lo muestra la figura 35, siendo la electura directa.

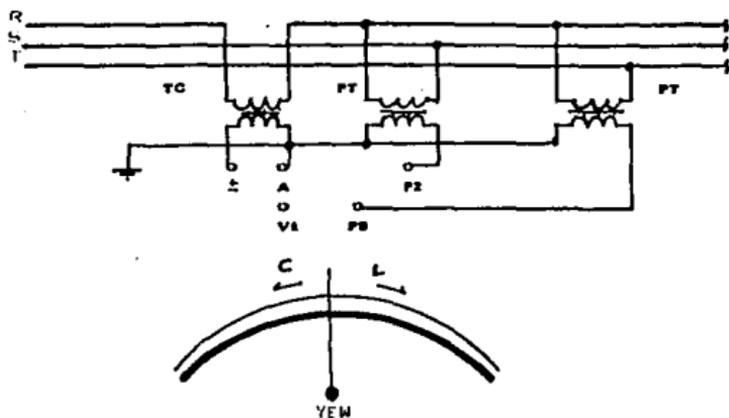


Figura 35. Conexión del medidor de factor de potencia con TC y TP

† Medición del  $\cos \phi$  de un circuito trifásico balanceado.

Método de los dos Wattmetros. Puede ser conectados de acuerdo con el diagrama de la figura 36.

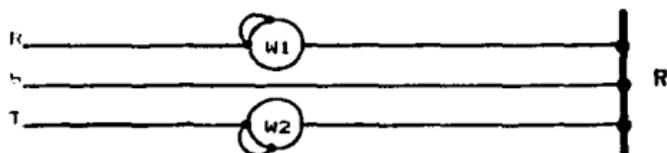


Figura 36. Método de los dos Wattímetros

Es muy importante realizar las conexiones correctas, de tal forma que un instrumento deflexiona en la dirección equivocada, las conexiones de las bobinas de corriente deben ser intercambiadas y la lectura tomada como un valor negativo. La suma de la lectura de los dos Wattmetros W1 y W2 dan la potencia disipada en la carga. La relación de esas dos lecturas resultan del retraso del voltaje-corriente, por ejemplo:

$$\tan \theta = \sqrt{\frac{W1 - W2}{W1 + W2}}$$

$$\cos \theta = 1 / \sqrt{1 + \tan^2 \theta}$$

Método gráfico, figura 37, que se ilustra a continuación, es posible encontrar el valor del  $\cos \theta$  como una función de la relación W1/W2.

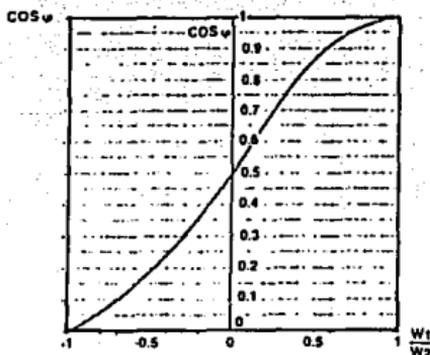


Figura 37.  $\cos \theta$  como una función de  $W1/W2$ .

\* Medición de carga reactiva con un circuito desbalanceado.

En tal circuito, el  $\cos \theta$  es diferente en cada fase. Para medir el  $\cos \theta$ , es necesario medir separadamente, en cada fase de la carga, la potencia, la corriente y el voltaje.

Si el neutro de cada carga conectada en estrella ( Y ) es inaccesible, es imposible la medición. En forma similar, si la carga conectada es Delta y las fases no pueden ser desconectadas para la medición, es imposible medir el factor de potencia en las fases.

Sin embargo para la carga total de la red es posible medir la potencia activa y reactiva y de esos valores obtener el valor promedio del factor de potencia. El diagrama del medidor de energía reactiva se muestra en la figura 38.

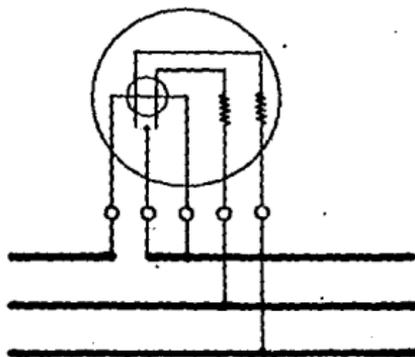


Figura 38. Diagrama de un medidor de energía reactiva

### Contadores de potencia reactiva

En el caso de una red trifásica tenemos que la potencia reactiva  $Q$  es:

$$Q = \sqrt{3} VI \sin \theta$$

La unidad utilizada industrialmente es el kilovar-hora (KVar-h).

El momento que hace girar el disco de aluminio del contador es de la forma:

$$M = K f \Phi_1 \Phi_2 \sin \beta$$

Luego tendremos que  $\Phi_1$  deberá ser proporcional a  $I$  y  $\Phi_2$  proporcional a  $f$  y  $V$ , y entonces tendrá que cumplirse que  $\beta = \sin \theta$  para que el momento de giro sea proporcional a la potencia reactiva:

$$M = K_1 V I \sin \theta$$

La aplicación de estos contadores es el control del factor de potencia de las instalaciones receptoras.

## 2.3 RAZON JUSTIFICATIVA DE UTILIZACION DE ALTA TENSION

Las ventajas que supone la utilización de la alta tensión son dos fundamentalmente:

- 1) Reducción de la sección de los conductores. La sección de los conductores eléctricos es proporcional a la intensidad que deban transportar. Por consiguiente, para una misma potencia transportada la intensidad será tanto menor cuando mayor sea la tensión, y, por tanto, a mayor tensión, menor sección para una misma potencia. Tendremos, pues, menor peso, menor costo, apoyos menores, etc.

2) Disminución de las pérdidas en el transporte. En una línea eléctrica, la mayor componente de pérdidas es la debida al efecto joule ( $I^2 \times R$ ). Por tanto, las pérdidas por este motivo son proporcionales al cuadrado de la intensidad, luego para una misma línea ( $R = \text{cte}$ ), las pérdidas varían en razón inversa al cuadrado de la tensión.

Ejemplo:

Se tiene una línea de 220 V que transportará una potencia de 38 KW. Calcular la intensidad y la sección del conductor.

Solución

$$P = \sqrt{3}VI \quad \text{Considerando } \text{fp} = 1$$

$$I = P / \sqrt{3}V = 38,000 / 380 = 100 \text{ A}$$

De tablas para 100 A le corresponde un diametro de 70 mm<sup>2</sup>

Si ahora hacemos que la tensión sea de 22 KV, para las mismas condiciones tendremos:

$$I = P / \sqrt{3}V = 38,000 / \sqrt{3} \times 22,000 = 1 \text{ A}$$

De tablas para 1 A es suficiente una sección del orden de 0.2 mm<sup>2</sup> con esto se ve claramente cómo la reducción de sección es muy considerable.

Pérdidas de potencia por efecto Joule, considerando que la resistencia total de la línea es de 20  $\Omega$ , ejemplo:

En el primer caso, las pérdidas por efecto joule son:

$$P_j = I^2 \times R = 100^2 \times 20 = 200,000 \text{ W}$$

en el segundo caso serán:

$$P_j = I^2 \times R = 1^2 \times 20 = 20 \text{ W}$$

Veamos pues, que para una tensión cien veces mayor, las pérdidas son diez mil veces menores.

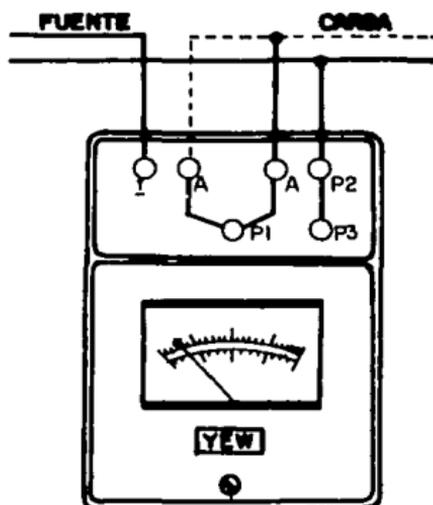
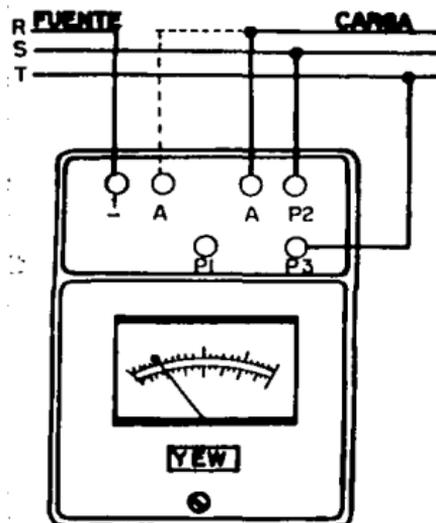
FACTOR DE PODER METRICO  
PORTATIL

YEW

PODER (aprox)		
120 V	0.14	VA
1 A	2.2	VA
5 A	2.4	VA

TRABAJO VOLT. O CORRIENTE ERROR				
120 V	60	5	300 V	$\pm 1.5^{\circ}$
1 A	.2	5	2 A	$\pm 3^{\circ}$
5 A	1	5	10 A	$\pm 3^{\circ}$

TIPO  
2039



## WATTMETRO POLIFABICO PORTATIL

CARGAS DE PODER (WATTS)=INDICACION (WATTS)X CONSTANTE DE MULTIPLICACION

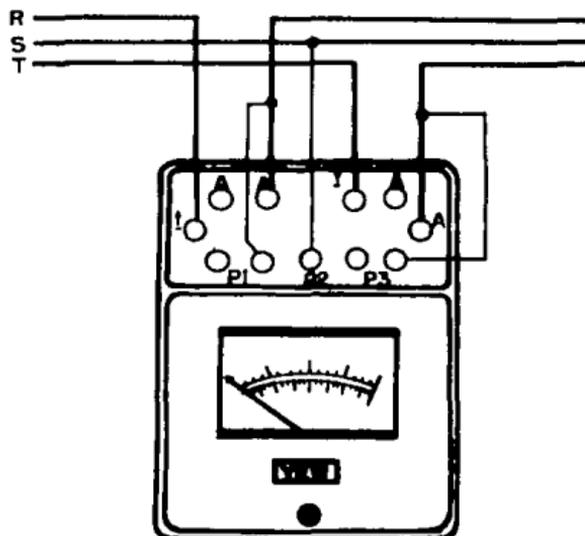
11-

TIPO  
2042

VOLTAJE	RANGO	CONSTANTE DE MULTIPLICACION	
		120V	240V
CORRIENTE	RANGO	2	4
		10	20

CIRCUITO DE VOLTAJE		
RANGO	RESISTENCIA	
	IZQUIERDO	DERECHO
120 V	APROX. 12K $\Omega$	APROX. 12 K $\Omega$
240V	APROX. 24K $\Omega$	APROX. 24K $\Omega$

CIRCUITO DE CORRIENTE		
RANGO	RESISTENCIA	
	IZQUIERDO	DERECHO
1A	0.93 $\Omega$	0.93 $\Omega$
5A	0.034 $\Omega$	0.034 $\Omega$



CAPITULO TRES

FACTOR DE POTENCIA

### 3.1 DEFINICION Y CALCULO DEL FACTOR DE POTENCIA (fp)

Definición- La relación de la potencia real de una corriente alterna con respecto a la potencia aparente. La razón de potencia en Watts a los voltamperes. el coseno del ángulo de fase de la corriente alterna con respecto a la del voltaje. Puede ser expresada en decimal o como porcentaje, ángulo que representa la fase de la impedancia  $Z$ , la razón de resistencia a impedancia. La intensidad de corriente que circula por un circuito de corriente alterna puede considerarse como la resultante de dos componentes: una en fase con la tensión y la otra defasada, como indica la figura 39.



Figura 39. Componente de la intensidad de corriente por efecto del ángulo de desfase.

La componente en fase se llama componente activa, porque al multiplicar su valor por la tensión se obtiene la potencia activa o real del circuito; es decir, será la única corriente susceptible de ser transformada en energía mecánica (torque o par) en el caso

de motores y satisficará la ecuación:

$$I = I \phi$$

$I$  = Far de salida

$\phi$  = Flujo neto en el espacio de aire como un resultado de la corriente magnetizante.

$I$  = Corriente activa.

$K$  = Constante (dependiendo de la máquina en estudio).

En corriente trifásica, la potencia activa es:

$$P = V I_a \sqrt{3}$$

$P$  = Potencia activa en kW

$V$  = volts en la línea

$I_a$  = corriente activa en amperes

Pero como puede verse en la figura 39:

$$I_a = I \cos \theta$$

de donde resulta:

$$P = V I \sqrt{3} \cos \theta$$

La componente desfasada se llama componente reactiva o magnetizante y suministra una potencia que sirve para establecer el circuito magnético, pero no contribuye directamente a la potencia real del motor.

La potencia resultante de la componente reactiva de la intensidad de corriente se llama potencia reactiva. En corriente trifásica, dicha potencia tendrá una expresión:

$$W = V I \sqrt{3} \sin \theta$$

Pero la red, se absorbe en realidad una corriente  $I$  y se llama potencia aparente (S) a la que resulta de su consumo. En corriente

trifásica viene expresada por la relación:

$$S = V I \sqrt{3}$$

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

La figura 09 muestra que cuando mayor es el ángulo de defasamiento  $\theta$ , mayor es la componente reactiva y menor la de la componente activa de una corriente dada.

Conviene evidentemente, que el  $\cos \theta$  ( factor de potencia ) del motor se aproxime todo lo posible a 1.

Del triángulo de potencias tenemos que el factor de potencia  $f_p$  tendrá una expresión:

$$f_p = \cos \theta = P / \sqrt{3} \times S = W / \sqrt{3} V I$$

V = Voltaje nominal

I = Corriente nominal

$$f_p = R/Z$$

Z = compleja

$$f_p = \sqrt{1 - ((\omega L) - (\omega C)^2) / Z^2}$$

$$f_p = P Z / V^2$$

$$f_p = P / I^2 Z$$

$$f_p = \sqrt{1 - ((X_L - X_C) / Z)^2}$$

### 3.2 PROBLEMAS CON UN BAJO FACTOR DE POTENCIA

Una carga que consume 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 en la red. Con un factor de potencia de 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 11% más alta que la corriente útil.

Para una potencia constante, la cantidad de corriente de la red se incrementará en medida que el factor de potencia disminuya.

Esto significa que los transformadores y cables de distribución estarán sobrecargados y las pérdidas en ellos se incrementarán.

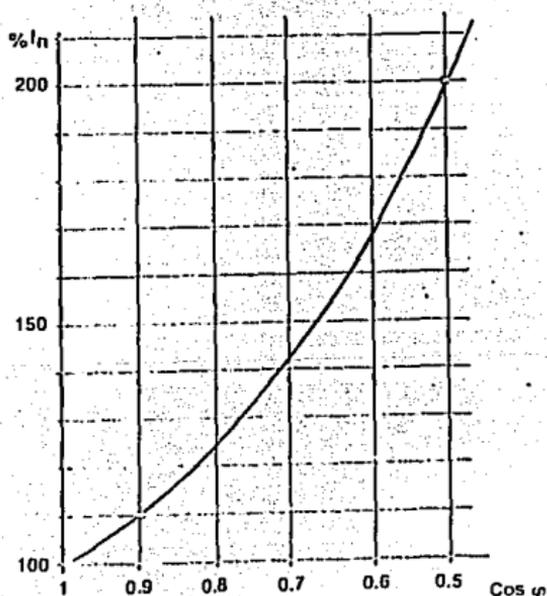


Figura 40. Gráfica que muestra la corriente nominal afectada por el  $\cos \theta$ .

Hemos 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 ocasionara muchas desventajas para el usuario industrial, todo lo cual tiene repercusiones financieras, estas costosas desventajas pueden situarse en 4 categorias: las cuales se verán a continuación:

\* 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 resultado de un insuficiente suministro de potencia a las cargas (motores, lámparas, etc.); estas cargas sufren una reducción en su potencia de salida.

La 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 capacidad resultado en altos costos de depreciación. Esto es particularmente importante en el caso de transformadores de distribución.

\* Esas desventajas también afectan al producto y al distribuidor de energía eléctrica. Es completamente comprensible, sin embargo, que él debe penalizar al usuario malo haciendo que el mismo pague más por su electricidad.

### 3.3 FACTOR DE POTENCIA DE UNA INSTALACION

Como cada receptor de los conectados de una instalación tiene un factor de potencia determinado y normalmente distinto, hay que calcular el valor global que es el que nos limita la compañía suministradora.

Para calcular, es necesario conocer la potencia y el  $fp$  de cada uno de los receptores y así tendremos que el factor de potencia global será:

$$fp = \frac{\sum P}{\sqrt{\sum P^2 + \sum Q^2}}$$

Ejemplo:

En una instalación eléctrica se tienen los siguientes receptores:

1) motor de 1 HP y  $fp=0.6$

2) motor de 10 HP y  $fp=0.8$

3) motor de 20 HP y  $fp=0.5$

4) 50 lámparas fluorescentes de 40 W y  $fp=0.4$

Se realiza un cuadro de potencias:

RECEPTOR	POTENCIA ACTIVA PFP CVX786	FP	SEN $\theta$ $\sqrt{1 - \cos^2 \theta}$	Tg $\theta$	Q Q=Pxtg $\theta$
1	706	0.6	0.8	1.33	978.88
2	7.360	0.8	0.6	0.75	5.520.00
3	14.720	0.5	0.86	1.72	25.318.40
4	2.000	0.4	0.91	2.27	4.540.00
$\Sigma$	24.716				36.357.28

Conocidas las potencias activa y reactiva totales tendremos

$$\begin{aligned} \cos\phi &= \Sigma P / \sqrt{\Sigma P^2 + \Sigma Q^2} = 24.716 / \sqrt{24.716^2 + 36.357.28^2} \\ &= 0.597 \end{aligned}$$

### 3.4 PERDIDAS EN LOS CABLES

Para la misma potencia transmitida, una mejora en el  $\cos\phi$  significa una reducción en la corriente principal.

Para un cable dado, las pérdidas son proporcionales al cuadrado de la corriente. Para mejorar el  $\cos\phi$  de un valor inicial  $\cos\phi_1$  a un valor de  $\cos\phi_2$ , las pérdidas  $I^2R$  en Watts pueden ser reducidas por un factor.

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

Vemos que una mejora en el  $\cos\phi$  0.6 a 0.8 reduce las pérdidas en un 44 %, y una mejora de 0.6 a 1.0 resultará en una reducción del 64%. Aunque esos factores sean bien conocidos, poca atención es dada para las posibles mejoras en economía. La figura 41 nos muestra la relación de pérdidas en los conductores respecto a los valores dados de  $\cos\phi$ .

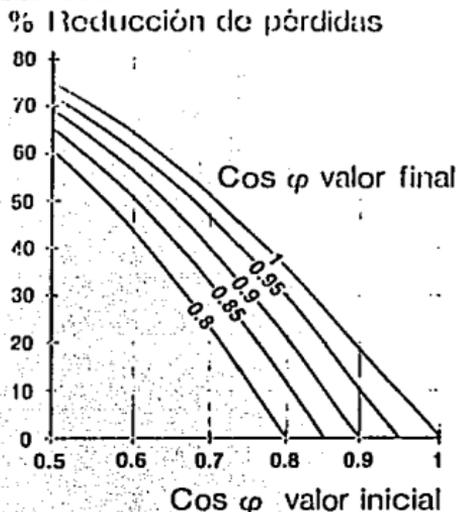


Figura 41. Pérdidas en los cables

Ahorro por corregir el factor de potencia de  $\cos \theta_1$  a  $\cos \theta_2$ .

Supongamos que tenemos una instalación que alimenta a un grupo de motores.

Datos del motor: 37 kW, 380 V,  $\text{fp } 0.72$ .

El cable alimentado es tipo aéreo de  $25 \text{ mm}^2$  con una longitud de 180 m. La instalación está en servicio 480 h/año.

¿Cuál es el ahorro en kWh, cuando el factor de potencia es mejorado de 0.72 a 0.95?

Determinación de la corriente de fase

$$\text{Con } \cos \theta: I = 0.72 = P / \sqrt{3} V \cos \theta = 37,000 / 1.73 \times 380 \times 0.72 = 79 \text{ A.}$$

$$\text{Con } \cos \theta: I = 0.95 = 37,000 / 1.73 \times 380 \times 0.95 = 59 \text{ A}$$

Resistencia del cable ( por fase ).

La tabla de la figura 42 muestra las pérdidas del cable siendo para  $35 \text{ mm}^2 = 0.0005 \Omega/\text{m}$ .

Resistencia total  $= 0.0005 \times 100 = 0.09 \Omega$

Pérdidas Térmicas.

$\cos \phi = 0.72$ . Tenemos  $P = 3 \times R \times I^2 = 3 \times 0.09 \times 78^2 = 1.643 \text{ W}$ .

$\cos \phi = 0.95$ . Tenemos  $P = 3 \times 0.09 \times 59^2 = 940 \text{ W}$

Diferencia = 703 W

Concluimos que corrigiendo el factor se reducen las pérdidas.

Resistencia a 20°C en ohmios de cable eléctrico					
La tabla siguiente muestra los valores de resistencia en ohms por metro de acuerdo a las especificaciones VDE y de acuerdo a las respectivas normas internacionales para muestras con sección transversal uniforme					
DIÁMETRO mm	ÁREA DE SECCIÓN mm <sup>2</sup>	PESO KG/KM	RESISTENCIA EN OHMS DE ACUERDO A VDE		DE ACUERDO A ESTÁNDARES
			ALAMBRE DE COBRE BLAUE	ALAMBRE DE COBRE ESTRANÇO EN FRO	
0.06	0.00196	0.017	8.648	8.376	8.706
0.10	0.00785	0.070	2.234	2.218	2.196
0.20	0.3142	0.280	0.558	0.549	0.549
0.30	0.07096	0.629	0.249	0.237	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	0.0670	0.0643	0.0610
0.70	0.3849	3.43	0.0496	0.0472	0.0449
0.80	0.5027	4.47	0.0379	0.0362	0.0343
1.00	0.7854	6.99	0.0223	0.0227	0.0220
1.12	1	8.9	0.0175	0.0178	0.0172
1.12	1.21	10.07	0.0155	0.0156	0.0152
1.30	1.6	12.25	0.0117	0.0119	0.0115
1.5	1.767	15.72	0.00892	0.0101	0.00978
1.75	2.5	22.3	0.00702	0.00716	0.00690
2	2.142	28	0.00558	0.00568	0.00549
2.25	4	25.8	0.00439	0.00447	0.00431
2.5	6.309	47.3	0.00330	0.00336	0.00325
2.75	8	53.4	0.00299	0.00299	0.00287
3	7.069	62.9	0.00249	0.00252	0.00244
3.2	8.042	71.8	0.00218	0.00222	0.00216
3.4	9.079	80.8	0.00183	0.00187	0.00180
3.57	10	89	0.00175	0.00179	0.00172
4.32	18	142.4	0.001100	0.001118	0.001078
5.02	25	222.5	0.000702	0.000715	0.000686
5.67	35	311.5	0.000507	0.000510	0.000481
7.97	50	445	0.000361	0.000357	0.000344
11.00	95	815.5	0.000195	0.000188	0.000181

Figura 42. Tabla de resistencia de alambre de cobre

Método por nomogramas para la estimación de pérdidas activas por metro de cable para uso de potencia en un periodo de 3.000 horas por año con tres fases con alimentación de 380 V

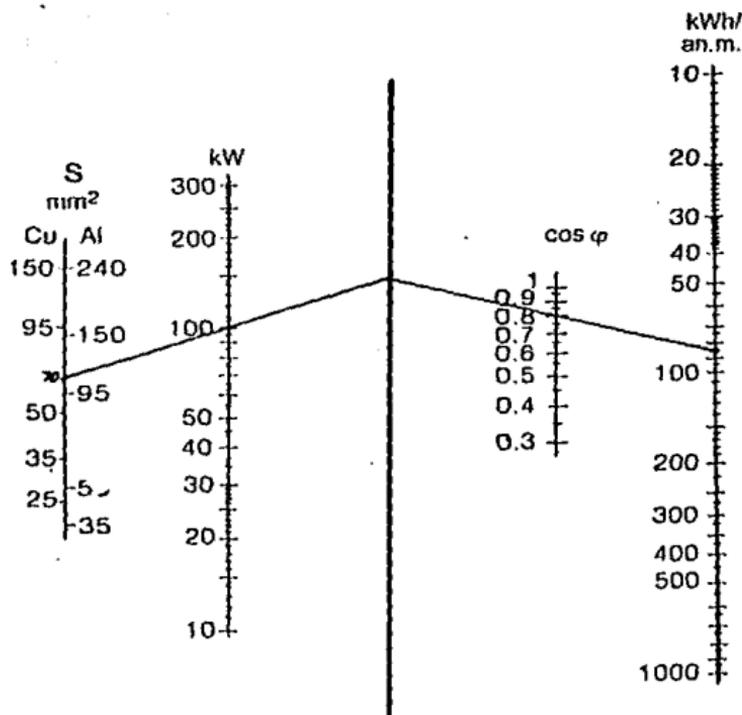


Figura 49. Monograma para la estimación de pérdidas activas en conductores de cobre y aluminio.

Ejemplo:

Calibre AWG 1/0

de tablas del anexo I: 70.43 mm<sup>2</sup>

Potencia instalada=100 Kw

fp=0.9

480 horas de uso

de la gráfica obtenemos 85 Kwh/m

tenemos que las pérdidas serán:

$$85 \times \left[ \frac{480 \times 12}{3.000} \right] = 163.2 \text{ Kw/metro}$$

Para 415 volts. se multiplica el resultado por 0.84

Para 220 volts se multiplica por 3

Del método anterior podemos observar que a mayor diametro con una misma potencia instalada las pérdidas son menores. así. al aumentar el factor de potencia tambien se reducen las pérdidas.

### 3.5 CALCULO DE CONDUCTORES

En el diseño de instalaciones eléctricas una de las tareas más importantes es el cálculo de la sección de los alimentadores. es decir. la especificación de los conductores que suministrarán energía eléctrica a una carga.

Los criterios para definir la sección transversal de los conductores AWG ( American Wire Gage ) o MCM ( miles de circular

milita, se requiere primero de la definición de la corriente que circulará por cada uno de los conductores en condiciones de plena carga ( corriente nominal ) dato de placa de los equipos que serán conectados y que se debe incluir una reserva para imprevistos.

Los principales criterios que se deben considerar para la especificación del conductor son: capacidad de conducción de corriente para las condiciones de instalación, caída de instalación, caída de voltaje permitida, capacidad para soportar la corriente de cortocircuito y calibre mínimo permitido para aplicaciones específicas. Otras menos importantes son: pérdidas por efecto Joule, fuerza de tiro en el proceso de cableado y alimentadores de calibres diferentes que pueden compartir la misma canalización.

Lo importante tener siempre presente, donde no se dispone en un momento determinado de toda la carga instalada, es aconsejable conocer la intensidad de corriente ( $I_c$ ) después de calculada y multiplicarse por un factor de Utilización (FU), o Factor de Demanda (FD) que varía de 0,6 a 0,9.

FD es el cociente de la potencia o demanda máxima entre la potencia o carga instalada, por lo tanto:

$$FD = \frac{P_{máx}}{P_{inst}}$$

En la siguiente página se muestra los factores típicos para algunas industrias y comercios ( en % ).

## FACTORES DE DEMANDA TIPICOS EN X

Comercio	fd
Alumbrado Público	100
Aparlamentos	35
Bancos	70
Bodegas	50
Casinos	85
Correos	30
Escuelas	70
Estacionamientos	60
Hospitales	40

Comercio	fd
Hoteles chicos	50
Hoteles grandes	40
Iglesias	60
Mercados	80
Multifamiliares	25
Oficinas	65
Restaurantes	65
Teatros	60
Tiendas abarrotes	65

Industria	fd
Acetileno (fábrica)	70
Armadora de autos	70
Carpinterías	65
Carne (empacadoras)	80
Cartón (fábrica)	50
Cemento (fábrica)	85
Cigarros (fábrica)	60
Dulces (fábrica)	45
Fundición	70
Galletas (fábrica)	55

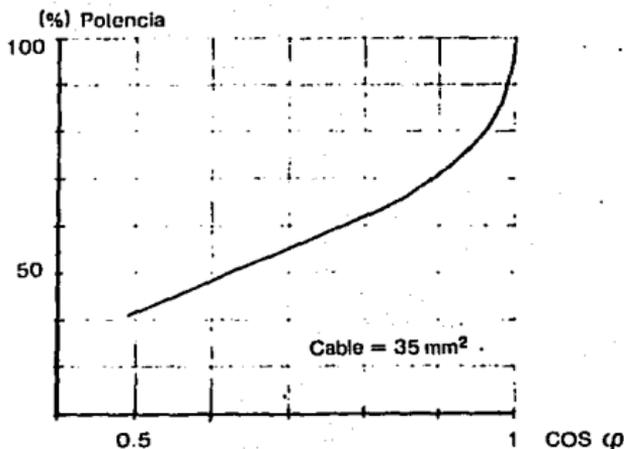
Industria	fd
Hielo (fábrica)	90
Herrerías	50
Imprentas	60
Jabón (fábrica)	60
Laminadora	70
Lavanderías	80
Niquelado (taller)	75
Hadererías	65
Hormerías	70
Mecánico (taller)	75

Industria	fd
Muebles (fábrica)	65
Panaderías	55
Papel (fábrica)	75
Periódicos	75
Pinturas (fábrica)	70
Química (industria)	50
Refinerías	60
Refrescos (fábrica)	55
Textiles (fábrica)	85
Vestidos (fábrica)	45
Zapatos (fábrica)	65

Caída de tensión.

Una línea de transmisión está eléctricamente construida de una resistencia y una inductancia en serie (cerca de 0.4 a 0.9  $\Omega$  por metro). La caída de voltaje en tal línea de transmisión a través de la cual una corriente con ángulo de fase  $\theta$  fluye, es dada a una primera aproximación por:

Caída de voltaje  $\Delta V = I(R \cos \theta + \omega L \sin \theta)$



Caída de voltaje en cables

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

$$I = \sqrt{3} V_l \cos \theta$$

$$e = nV^2 / \sqrt{3}$$

Por lo tanto la potencia máxima que se transmite es:

$$P = nV^2/R + \omega L \operatorname{tg} \phi$$

En la práctica con  $\cos \phi = 0.4$  la capacidad de la corriente de la línea aumenta casi linealmente hasta el valor de  $\cos \phi = 0.8$ , de ahí aumenta aún más rápidamente. Como puede notarse en la gráfica de la caída de voltaje para un cable de  $35\text{mm}^2$ , la potencia transmitida para una caída de voltaje dada, puede ser doble cuando mejoramos el  $\cos \phi$  de 0.65 a 1.

Otro método de obtener la caída de voltaje en una línea de transmisión esta dada por:

$$e = V_A - V_T$$

$V_A$  = Voltaje aplicado a los alimentadores (conductores)

$V_T$  = Voltaje al termino de los alimentadores

en porcentaje %

$$e\% = (e/V_{\text{nominal}}) \times 100$$

La máxima permitida por NTIE (1981) es 3% para el circuito alimentador principal y 3% para el circuito derivado, sin que los dos circuitos juntos sobrepasen el 5% .

Para baja tensión y calibres hasta 4/0 AWG se expresa la caída de voltaje en terminos de la ley de Ohm.

$$e = R \times I = \rho \frac{L \times I}{S}$$

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Para calcular el diámetro o sección del conductor contemplando la caída:

$$s = p (L \times I / e \times V) \times 100$$

S = Área o sección transversal  $\text{mm}^2$

p = Resistividad específica  $\text{ohm mm}^2/\text{m}$

I = Corriente de carga en Amperes

e = Caída de voltaje permitido en %

V = Voltaje aplicado ( $V_{\text{nom}}$ )

Según IACS (International Annealed Copper Standard) para  $60^\circ\text{C}$  de operación se tiene que  $p = 1/58$  por lo que para obtener la sección de conductores de cobre se utiliza la siguiente expresión:

$$s_{\text{cu}} = 2 \cdot cLI/eV$$

Para circuito monofásico y bifásicos  $c=2$  (por el hilo de retorno); para circuitos trifásicos  $c=\sqrt{3}$  ya que el voltaje nominal corresponde al voltaje entre las fases:

$$V_{\text{nom}} = \sqrt{3} \cdot V \text{ fase-neutro}$$

La sección obtenida se compara con los diferentes calibres de tablas y que tenga una área transversal igual o mayor.

Para 1 fase y neutro tenemos:

$$W = V I \cos \phi$$

$$I = W / V \cos \phi$$

caída de tensión:

$$e = 2RI \text{ (por ida y retorno)}$$

$$e = 2(p I / 58) L \quad L = \text{longitud del conductor}$$

$$e = LI / 25.5 \quad p = 1/58 \text{ para } 20^\circ\text{C} \text{ y } p = 1/50 \text{ para } 60^\circ\text{C}$$

$$e\% = e_0 \times 100/V$$

$$e\% = (LI/25S) \times 100/V = 4LI/SV$$

$$S = 4LI/Ve\%$$

Para 2 fases y neutro

$$W = 2VI \cos \theta$$

$$I = W/2V \cos \theta$$

$$e = RI = \rho I L/S = LI/50 S$$

$$e\% = e \times 100/V = (LI/50S) \times (100/V) = 2LI/SV$$

$$S = 2LI/V e\%$$

Para 3 fases

$$W = \sqrt{3} VI \cos \theta$$

$$I = W/\sqrt{3} V \cos \theta$$

$$I = W/\sqrt{3} V \cos \theta \quad \text{cuando se colocan motores}$$

$$e = R(\sqrt{3} I) = \sqrt{3} \rho I L/S = \sqrt{3} LI/50S$$

$$e\% = \sqrt{3} LI/50S \times 100/V_L = 2\sqrt{3} LI/SV$$

$$S = 2\sqrt{3} LI/V_L e\% \quad \text{pero } V_L = \sqrt{3} V$$

$$S = 2LI/V e\%$$

Para 3 fases (sin neutro) el cálculo de conductor S es el mismo del anterior así como su caída de tensión.

Ejemplo:

Calcular, los alimentadores tipo TW para alimentar una carga total de 10,000 W, resultante de sumar cargas parciales monofásicas y trifásicas conectadas a tensiones de 127.5 V y 220 V, considerando

un factor de potencia 0.9.

Datos:

$$W=18,000 \text{ Watts}$$

$$V_L=220 \text{ Volts}$$

$$V=127.5$$

$$\cos\theta=0.9$$

$$FD=0.7 \text{ considerando que es una laminadora}$$

$$\eta=0.85$$

Solución:

$$W = \gamma: V_L I \cos\theta \eta$$

$$I = W / \gamma: V_L \cos\theta \eta = 18,000 / 1.73 \times 220 \times 0.9 \times 0.85 = 18,000 / 291.16$$

$$I = 61.82 \text{ A.}$$

$$I_c = I \times FD = 61.82 \times 0.7 = 43.27 \text{ A.}$$

Para conducir una corriente de 43.27 A, se necesitan conductores con aislamiento tipo THW calibre 08 ver tabla de capacidad de corriente de conductores.

3 N 08      Para las fases

1 N 10      Para el neutro

Tipo de material.	T1RW, RW, T, TW, TWD, RW	RH, RHV, THW, THWN, DF, XHHW, RW	PILC, V, MI	TBS, AVB SIS, THWN TA, SA, FEP THW, RWI EP, HLV, XHHW*				
Temp. máxima	80°C	75°C	85°C	90°C				
Calibre AIA/HCH	en tubo	al aire	en tubo	al aire	en tubo	al aire	en tubo	al aire
14	15	20	15	20	25	30	25	30
12	20	25	20	25	30	40	30	40
10	30	40	30	40	40	55	40	55
8	40	55	45	55	50	70	50	70
6	55	80	65	85	70	100	70	100
4	70	105	85	125	90	135	90	135
3	80	120	100	145	105	155	105	155
2	95	140	115	170	120	180	120	180
1	110	165	130	195	140	210	140	210
0	125	195	150	230	155	245	155	245
00	145	225	175	265	185	285	185	285
000	165	260	200	310	210	330	210	330
0000	195	300	230	360	235	385	235	385
250	215	340	255	405	270	425	270	425
300	240	375	285	445	300	480	300	480
350	260	420	310	505	325	530	325	530
400	280	455	335	545	380	575	380	575
500	320	515	380	620	405	660	405	660
600	355	575	420	690	455	740	455	740
700	385	630	460	755	490	815	490	815
750	400	655	475	785	500	845	500	845
900	410	680	480	815	515	880	515	880
900	435	730	520	870	555	940	555	940
1000	455	780	545	935	585	1000	585	1000

Tabla de capacidad de corriente de conductores de cobre NTIE

Tipo de aislam.	AVA, AVL		AI, SA, AIA		A, AA, FEPB	
	110°C		125°C		200°C	
Temp. máx.						
Cable ALG/12H	en tubo	al aire	en tubo	al aire	en tubo	al aire
	14	30	40	30	40	30
12	34	50	40	50	40	55
10	45	65	50	70	55	75
8	60	85	65	90	70	100
6	80	120	85	125	95	135
4	105	160	115	170	120	180
3	120	180	130	195	145	210
2	135	210	145	225	165	240
1	160	245	170	265	190	280
0	190	285	200	305	225	325
00	215	330	230	355	250	370
000	245	385	265	410	285	430
0000	275	445	310	475	340	510
250	315	495	335	530	-	-
300	345	555	380	590	-	-
350	390	610	420	655	-	-
400	420	665	450	710	-	-
500	470	765	500	815	-	-
600	525	855	545	910	-	-
700	560	940	600	1005	-	-
750	580	980	620	1045	-	-
800	600	1020	640	1085	-	-
900	-	-	-	-	-	-
1000	680	1165	730	1240	-	-

Tabla de capacidad de corriente de conductores de cobre NTIE

En el caso de que se conociera la potencia reactiva instalada se pueda seleccionar al conductor segun la tabla mostrada a continuacion:

	POTENCIA KW	AL.P.S.		PROTECCION		CABLES		PESO KG	TIPO
		230V	220V	FUSIBLE (1)	TERMINAL 2. (2)	FASES (3)	TIERRA (4)		
240 VCA	5	12	11	30	20	3-10	1-12	3.7	CLMB2305
	7	17	15	30	30	3-18	1-12	3.8	CLMB2307
	10	24	22	60	40	3-8	1-10	3.9	CLMB2310
	15	36	33	60	50	3-4	1-10	5.5	CLMB4315
	20	48	44	100	70	3-3	1-8	9.0	CLMB5320
	25	60	55	100	100	3-2	1-8	9.5	CLMB5325
	30	72	68	200	100	3-1	1-6	10.0	CLMB5330
	40	96	88	200	150	3-2/0	1-6	14.0	CLMB6340
	50	120	110	200	175	3-4/0	1-6	15.5	CLMB6350
	60	144	132	250	200	3-250	1-6	16.5	CLMB6360
480 VCA		380V	440V						
	10	12	11	30	20	3-10	1-12	3.8	CLMB2310
	14	17	15	30	30	3-8	1-12	3.4	CLMB2314
	20	24	22	60	40	3-8	1-10	5.9	CLMB4320
	25	30	28	60	50	3-6	1-10	6.0	CLMB4325
	30	36	33	60	50	3-4	1-10	6.5	CLMB5330
	40	48	44	100	70	3-3	1-8	10.0	CLMB5340
	50	60	55	100	100	3-2	1-8	12.0	CLMB6350
	60	72	68	200	100	3-1	1-6	15.5	CLMB6360
	70	84	77	200	125	3-1/0	1-6	17.0	CLMB6370
80	96	88	200	150	3-2/0	1-6	22.0	CLMB6380	

1) Dimensionados a un minimo de 165% de la corriente nominal, de acuerdo con las NORMAS TECNICAS PARA INSTALACIONES ELECTRICAS, PARTE I SECCION-DGN.

2) Dimensionadas a un minimo de 135% de la corriente nominal, de acuerdo con las NORMAS TECNICAS PARA INSTALACIONES ELECTRICAS, PARTE I SECCION-DGN

Conductores IAW, dimensionados a un mínimo de 125% de la corriente nominal y temperatura ambiente máxima de 50°C, de acuerdo con las NORMAS TECNICAS PARA INSTALACIONES ELECTRICAS, PARTE I SECOFIN-IGN

Diámetro del conductor destinado para tierra o neutro, de acuerdo con las NORMAS TECNICAS PARA INSTALACIONES ELECTRICAS, PARTE I SECOFIN-IGN

Ejemplo:

Se tienen 4 motores NEMA B par de arranque normal de 30 HP 1800 rpm 4 polos, cada motor consume 7,5 kvars.

Total de kvars=30

Cada motor tendrá que ser alimentado por 3 fases de calibre 8 según tabla V una protección fusible de 30 A. con elemento termomagnético de 30 A.

### 3.6 PERDIDAS EN UN TRANSFORMADOR

La eficiencia del transformador está en función de la carga que tiene conectada (Curva característica de eficiencia). Si un transformador está conectado permanentemente a la red, habrá un consumo permanente de energía equivalente a sus pérdidas en vacío (especificadas por el fabricante). En el momento que se le conecta alguna carga, las pérdidas correspondientes de esa carga serán:

$$P_c = P_n \left( \frac{I}{I_n} \right)^2$$

$P_c$  = Pérdidas correspondientes a cierto régimen de carga.

$I$  = Corriente al régimen de carga correspondiente.

$I_n$  = Corriente nominal (plena carga).

$P_n$  = Pérdidas debidas a la circulación de la corriente nominal por los conductores del transformador (pérdidas en el cobre).

Para obtener las pérdidas totales del transformador deberán sumarse las de vacío (consideradas constantes) o pérdidas en el entrehierro y las obtenidas en la expresión anterior.

Por lo general la eficiencia máxima de un transformador se obtiene cuando la carga está entre 75% y 100%, por lo que debe procurarse que el transformador se utilice en regímenes de carga cercanos al 100%. Sin embargo al momento de especificar un transformador se requiere prever cierta holgura para reservas futuras.

Las pérdidas en el núcleo corresponden aproximadamente a la

potencia disipada en el transformador bajo condiciones sin carga. Entonces resulta conveniente determinar la carga promedio y procurar que se mantenga dentro de ese rango.

Para calcular la carga promedio se utiliza la siguiente expresión:

$$I_{prom} = \sqrt{\frac{\sum I_j^2 t_j}{\sum t_j}}$$

donde:

$t_j$  1, 2, ... Períodos de tiempo donde en que la carga conectada es diferente (ciclos, turnos de trabajo o días hábiles).

$I_j$  Carga constante durante el período de tiempo  $t_j$ , corregida por el factor de potencia.

Concluimos que las pérdidas en un transformador son de dos tipos: pérdidas en el entrehierro (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 directamente relacionadas con el factor de potencia.

Por lo tanto las pérdidas totales son iguales a las pérdidas en el núcleo más las pérdidas en el cobre a plena carga, corregidas por la relación al cuadrado de las potencias a la carga dada dividida por la potencia a plena carga.

$$P_t = P_{cu} + P_{fe} \left( \frac{\text{Potencia a la carga}}{\text{Potencia a plena carga} \times fp} \right)^2$$

Supongamos que tenemos un transformador de 500 KVA dando 300 KW con un factor de potencia de 0.85, con pérdidas normales.

Las pérdidas totales son:

De la gráfica de la figura 44, obtenemos las pérdidas del cobre y del núcleo y así obtenemos los valores marcados para estos datos.

$$P_{cu} = 600$$

$$P_{fe} = 1150$$

Por lo tanto tenemos que las pérdidas totales corregidas son:

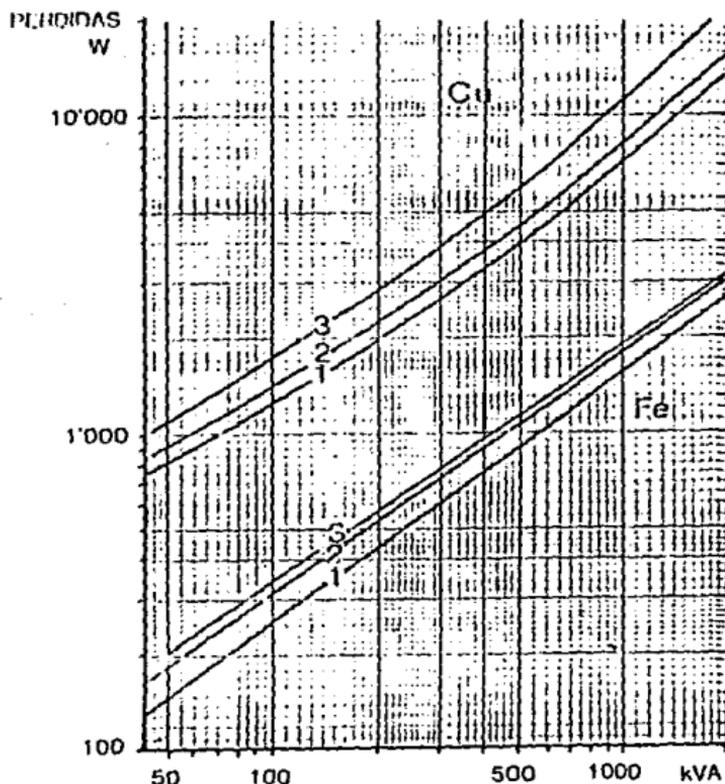
$$P_t = 1150 + 6000 \left( \frac{300}{500 \times 0.85} \right)^2 = 1150 + (6000 \times 0.4983) = 4,139.8 \text{ W}$$

Si el factor de potencia puede ser mejorado en la unidad, las pérdidas pueden ser reducidas a 3,310 W.

Suponiendo un tiempo de trabajo de 480 horas por mes, la reducción de pérdidas anual será:

$$\text{Con una ganancia de } 4,139 - 3,310 = 829.8 \text{ W}$$

$$\text{Reducción de pérdidas} = 829.8 \times 480 \times 12 = 4,779.65 \text{ Kwh.}$$



1-perdidas normales, 2 pérdidas bajas, 3 pérdidas extrabajas

Figura 66. Valores de las pérdidas del núcleo y del embobinado

La potencia que puede ser liberada de un transformador está 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, pero el requerimiento es para potencia activa. Un transformador es mucho mejor utilizado cuando el factor de potencia de la carga está cercano a la unidad.

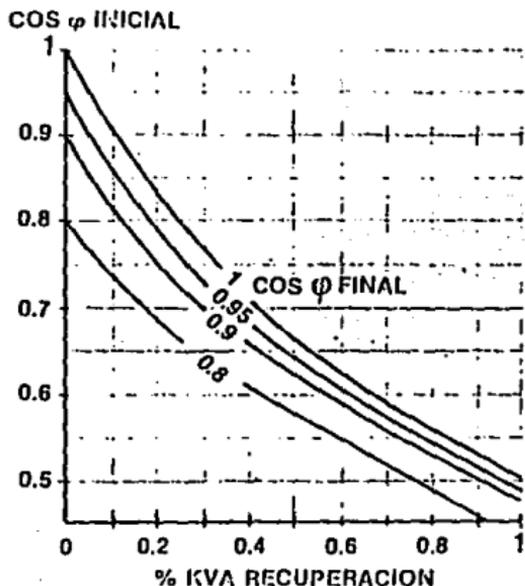


Figura 45. Recuperación de potencia en un transformador

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

$$KVA = KW \left[ \frac{1}{\cos \theta_1} - \frac{1}{\cos \theta_2} \right]$$

Lo cual nos da en forma gráfica figura 45 por kW de carga la potencia aparente recuperada.

Ejemplo:

Un transformador de 400 KVA, con una carga de 300 kW con un factor de potencia  $\cos \theta = 0.65$ , está cargado a su máximo. Si el

factor de potencia es mejorado a  $\cos\theta=0.9$  tendremos:

$$KVA = 300 \times (1.04 - 1.11) = 120.21 \text{ KVA}$$

De la gráfica de la figura 4b, tenemos una recuperación de 0.42. Al mejorar el factor de potencia de 0.63 a 0.9, 120.21 KVA serán aprovechados. Esto muestra que tan importante es mantener el factor de potencia en la salida del transformador tan cercano a la unidad como sea posible.

#### \* Caída de voltaje de un transformador.

Un transformador tiene una resistencia primaria, una resistencia secundaria y una inductancia (de fuga) sobre el primario y el secundario. Esto puede ser analizado utilizando el diagrama de Imp., el cual muestra que con carga el transformador tendrá una caída de voltaje en su lado secundario.

En la práctica una prueba de corto circuito es hecha, en esta prueba se determina el valor del voltaje primario (expresado como un porcentaje del voltaje nominal), necesario para dar la corriente nominal sobre el lado secundario cortocircuitado. Este valor puede variar dependiendo del tipo de transformador entre 2 y 12 %. Esto está 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 (AVr) y la caída de voltaje inductivo (AVs).

En la práctica la caída de voltaje relativo (en %) es siempre más

pequeña que el voltaje de cortocircuito. Esta caída de voltaje está directamente relacionada con la corriente. También varía, asumiendo corriente constante con el factor de potencia. Con el factor de potencia bajo, la caída de voltaje es más alta. Si el circuito es capacitivo, el voltaje de salida del transformador se incrementará.

Un método para compensar la caída de tensión en el sistema es variando los taps del transformador que incrementa en 2.5% el voltaje.

Caída de Voltaje

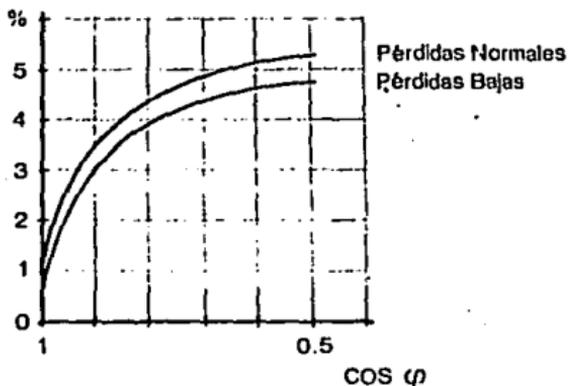


Figura 46. Caída de voltaje en los transformadores

### 3.7 CAUSAS DE VARIACION DEL FP POR MOTORES ASINCRONOS

La principal causa que origina variación en el factor de potencia en los motores eléctricos es la carga acoplada al motor que deberá mover durante el ciclo de trabajo; dicha variación se podrá apreciar mejor mediante la gráfica de la figura 47, en la cual el factor de potencia y la carga están expresadas en porcentaje.

Medicha gráfica decimos que todos y cada uno de los motores de inducción deben ser operados a plena carga como sea posible; es decir, no deben ser utilizados con cargas donde prevalecen condiciones prolongadas de ligera carga o de operación sin carga; tampoco deben ser operados los motores bajo regímenes de velocidad bajos. En otras palabras, la intensidad de corriente consumida en vacío es en gran parte una intensidad magnetizante, esto es que además de la potencia activa, el motor asincrono también requiere de potencia reactiva para la magnetización de sus bobinados; retrasando o defasando la corriente respecto al voltaje, por lo que un motor ligeramente cargado el factor de potencia es bajo. A causa del entrehierro, la reluctancia del circuito magnético es grande, lo que da por resultado un valor de la corriente magnetizante relativamente elevado comparado con un transformador. Al mismo tiempo, un aumento en la corriente de magnetización obtenido por el aumento de voltaje aplicado, conducirá a una disminución del factor de potencia. Por otro lado, para valor de potencias iguales, un motor operado a baja velocidad demandará una corriente de magnetización alta en relación con un motor de alta velocidad. El motor en baja velocidad tendrá, por lo tanto, un

factor de potencia bajo en relación con un motor de alta velocidad. En la gráfica de la figura 49, se muestra como afecta el factor de potencia respecto al número de polos.

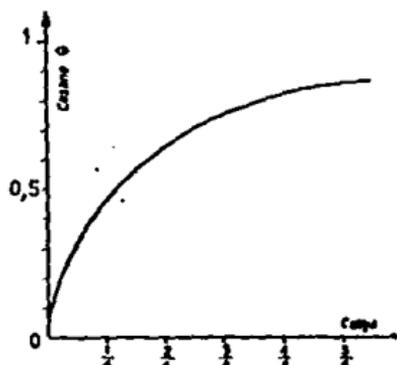


Figura 47. Gráfica del factor de potencia de acuerdo a la carga

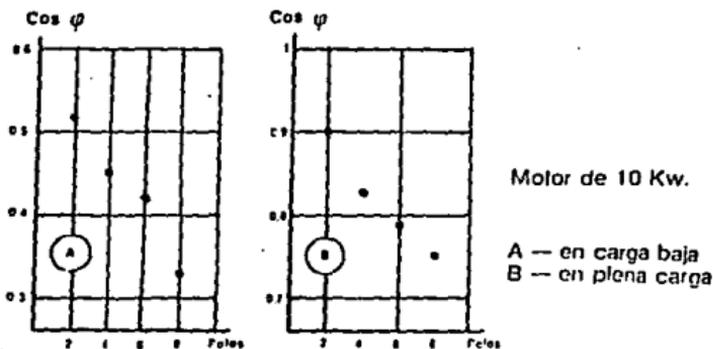


Figura 48. Gráfica de  $\cos \phi$  en función de sus polos y su carga.

С П Р А В О Ч Н И К

CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA  
POR CAPACITORES

#### 4.1 POR QUE EL USO DE CAPACITORES

En las redes eléctricas de corriente alterna, pueden distinguirse dos tipos de cargas: cargas ohmicas o resistivas y cargas reactivas ideales.

Una carga ideal siempre puede considerarse como compuesta por una parte puramente resistiva y otra reactiva ideal. En las cargas representadas por líneas de transmisión y distribución, transformadores, lámparas fluorescentes, motores eléctricos, equipos de soldadura eléctrica, etc. la parte reactiva de la carga suele ser de una magnitud comparable o mucho mayor que la parte puramente resistiva.

En el caso particular de las instalaciones industriales, la carga total viene a ser de carácter inductivo y la corriente está retrasada con respecto al voltaje (el factor de potencia es de tipo atrasado).

Las limitaciones dadas por la reglamentación al uso de energía eléctrica referente al bajo factor de potencia en una instalación industrial (penalida) y la reducción de capacidad de transformadores y generadores, pérdidas por efecto Joule en las líneas conductoras y su pérdida de regulación, obliga a medios compensadores de la carga inductiva con otra capacitiva, de donde los capacitores vienen a ser el medio más adecuado para este fin.

El uso de capacitores es para:

1. Compensar el bajo factor de potencia de una instalación industrial y evitar el pago de penalidad.

2. Aumentar la capacidad de carga de los transformadores
3. Reducir pérdidas por efecto Joule.
4. Mejor regulación de voltaje.

Mejorar el factor de potencia para una carga dada, implica la reducción de la fuerza reactiva (kVar). Y el modo de reducirla es introducir una componente de fuerza capacitiva que adelante la fuerza  $\Phi^U$  eléctricos como se ilustra en el diagrama de la figura 40.

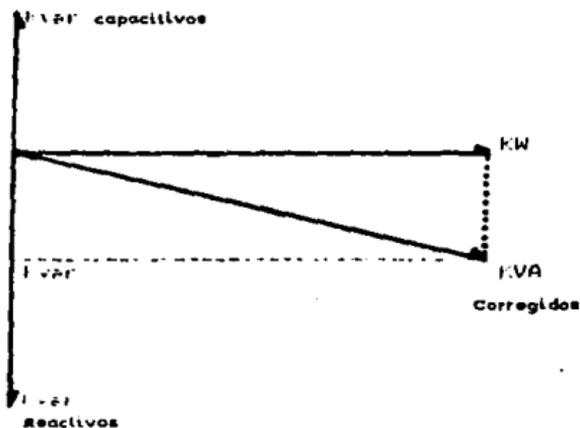


Figura 40. Reducción de la componente de fuerza reactiva por el uso de capacitores

## 4.2 CALCULO DE CAPACITORES

Segun el grafico 49. denominado triángulo de potencias, tenemos el vecto de potencia activa consumida por el receptor o conjunto de receptores. la potencia reactiva inicial y la potencia reactiva corregida por medio un capacitor; la forma de calcular el capacitor para aumentar el factor de potencia es la siguiente:

Si se tiene un valor inicial del factor de potencia ( $\cos\theta_1$ ) y queremos corregir a un factor de potencia ( $\cos\theta_2$ ). la diferencia será la potencia que debe absorber el condensador. Así:

$$P \text{ (del condensador)} = Q - Q' = P \times \operatorname{tg}\theta - P \times \operatorname{tg}\theta' = P \times (\operatorname{tg}\theta - \operatorname{tg}\theta')$$

$$= V^2 \times C \times \omega$$

De la ultima igualdad despejamos C y nos quedaria:

$$C = \frac{P \times (\operatorname{tg}\theta - \operatorname{tg}\theta')}{V^2 \times \omega} \quad (\text{Faradios})$$

donde:

P= Potencia activa (watts).

V= Voltaje nominal en voltios.

C= Capacidad del condensador en faradios

$\omega$ = Velocidad angular =  $2\pi f$

No obstante, el capacitor genera potencia reactiva expresada en Volts-Amperes Reactivos o (Vars). Del valor de la capacitancia podemos calcular la potencia reactiva. Así:

$$Q_C = 2\pi \times f \times C \times V^2$$

Ejemplo:

Calcular la capacidad del condensador necesario para hacer que el factor de potencia sea la unidad ( $\cos\phi=1$ ), en una instalación de alumbrado fluorescente de 100 tubos de 75 W cada uno, con un  $\cos\phi=0.6$  con una tensión de 220 V.

$$\text{Si } \cos\phi=0.6 \dots \dots \dots \phi=1.33$$

$$\text{Si } \cos\phi=1 \dots \dots \dots \phi=0$$

$$C = \frac{P \times (\cos\phi - \cos\phi') \times 10^6}{V^2 \times \omega} = \frac{100 \times 75 (1.33 - 0) \times 10^6}{220^2 \times 2\pi \times 60}$$

$$C = 546.68 \mu\text{F}$$

Si la frecuencia (f) es de 60 Hz, la capacitancia de 546.68  $\mu\text{F}$  y el voltaje de la red de 220, la potencia reactiva generada es:

$$U = 2\pi f C \times V^2 = 376.99 \times 546.60 \times 10^6 \times 220^2$$

$$U = 9.9750 \times 10^6$$

De lo anterior podemos concluir que:

$U = P(\cos\phi - \cos\phi')$  en Vars Capacitivos

Si la tensión nominal de alimentación (ca) es de 120V y  $P=20$  Watts, Calcular el valor del capacitor para corregir el factor de potencia de .70712 ( $45^\circ$ ) retrasada a un factor de potencia de 0.902 ( $25.6^\circ$ ), siguen siendo inductivos.

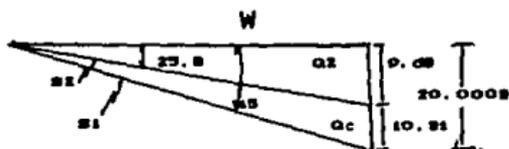
Datos:

$$V=120 \text{ Vca}$$

$$P=20 \text{ Watts}$$

$$\cos\theta=0.7071$$

$$\cos\theta'=0.9$$



considerando  $\cos\theta=0.7071$  como inicial:

$$S_1=20/0.7071=28.28 \text{ VA}$$

$$S_2=20/0.9=22.22$$

$$Q_1=\sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{28.28^2 - 20^2} = 20.94 \text{ Vars}$$

$$Q_2=\sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{22.22^2 - 20^2} = 9.68 \text{ Vars}$$

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = 20.94 - 9.68 = 10.3139 \text{ Vars}$$

$$I_c = Q_c/V = 10.3139/120 = 0.0859 \text{ Amp.}$$

$$X_c = Q_c/I_c^2 = 10.3139/0.0859^2 = 1.396.168 \Omega$$

$$C = 1/2\pi f X_c = 1/377 \times 1.396.168 = 1.89 \mu\text{F}$$

$$Q_c = (tg \cos^{-1} 0.7071 - tg \cos^{-1} 0.9) 20$$

$$Q_c = 10.31 \text{ Vars}$$

$$C = Q_c / \omega \times V^2 = 10.31 / 377 \times 120^2 = 1.8 \mu\text{F}$$

Estas formulas son validas para líneas monofásicas. El condensador que resulta, por cálculo. Un sistema trifásico se puede conectar en estrella o en delta en el cual este ultimo es el más utilizado ya que la capacidad necesaria en este caso es tres veces menor que en estrella y por lo tanto se ahorrará dinero.

El proceso de cálculo a seguir para la deducción de la fórmula será:

$$P = \sqrt{3} V_{\text{línea}} \times I_{\text{línea}} \times \cos\theta \text{ (POTENCIA ACTIVA EN WATTS)}$$

$$Q = P \times tg\theta \text{ (POTENCIA REACTIVA EN VARS)}$$

$$Q' = P \times tg\theta' \text{ (POTENCIA REACTIVA CORREGIDA)}$$

$$U_{ca} = \frac{V^2}{\omega C} \quad \text{POTENCIA REACTIVA DEL CAPACITOR (VAR)} \quad (1)$$

$$P_{ca} = 3 V C \omega \times R (\tan \theta - \tan \theta') \quad \text{Vars}$$

$$C = \frac{P (\tan \theta - \tan \theta')}{3 V^2 \omega} \quad \text{Faradios}$$

La conexión periférica será la delta, ver (figura 50), ya que al ser inversamente proporcional al cuadrado de la tensión de fase, como la tensión de fase en delta es  $\sqrt{3}$  mayor que la tensión de fase en estrella, al ser al cuadrado, quiere decir que la capacidad en delta es tres veces menor que la capacidad en estrella y resulta más barata.

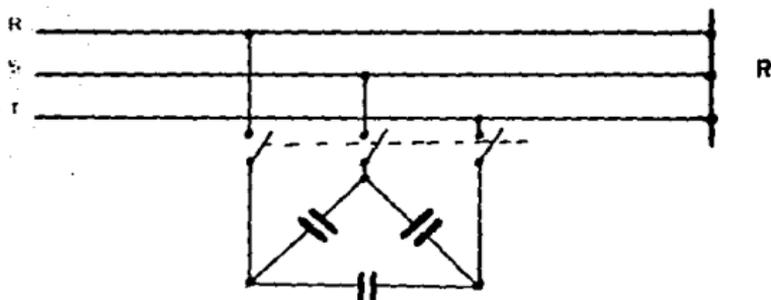


Figura 50. Conexión en delta de capacitores para corregir el factor de potencia.

Para medir los condensadores son muchos los métodos pero los más importantes son tres:

- 1.-Método industrial (con voltímetro y amperímetro).
- 2.-Método de oscilaciones de relajación ( lámpara de neón).
- 3.-Método de laboratorio (Puente de Sauty).

El método industrial consiste en medir la impedancia de un capacitor con voltímetro y amperímetro en (c.a.) como lo indica la figura 51. Así como en las bobinas se considera una parte ohmica pura y otra inductiva, aquí vamos a considerar solamente la parte capacitiva, ya que las pérdidas son pequeñas si el capacitor está en buen estado.

Según la ley de Ohm, en alternas:

$$V=I \times Z$$

Y al considerar condensador ideal:

$$Z=1/C \times \omega$$

Quedaría:

$$V= I ( 1/C \times \omega)$$

$$C=I/V \times 2 \pi \times f$$

Ejemplo:

En el circuito de la figura 51, se hace una medida en red a la tensión de 220 V, y los aparatos nos indican lo siguiente:

Voltímetro= 210 Voltios.

Amperímetro=3.5 Amperes.

Calculando la capacidad del condensador ensayado será:

$$C= I/V \times 2 \pi \times f = 3.5/210 \times 2 \times 3.14 \times 60 = 3.5/82.2 \times 10^3 = 42.6 \times 10^{-6} \text{ F.}$$

para tener el dato en  $\mu\text{f}$  se multiplica por  $10^6$

Entonces  $\mu\text{f}$

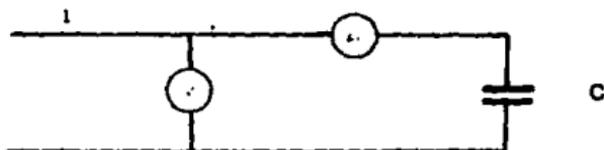


Figura 51. Medida de capacidades. Método industrial.

Método de oscilaciones de relajación, aunque no es muy preciso, tiene la gran ventaja de su sencillez y bajo costo, pues se necesita sólo una lámpara de neón, una resistencia de  $2\text{M}\Omega$  a  $1\text{W}$ , una fuente de alimentación de c.c. y un cronómetro.

El montaje es el de la figura 51, este método se basa en la propiedad de las lámparas de neón de encenderse (cebarse) para tensiones un poco superiores a la mitad de la nominal y apagarse (descabarse) para tensiones un poco inferiores a la de encendido o cebado.

Se alimenta en bornes con una tensión continua ( $V_{cd}$  o  $V_{cc}$ ), al circular una corriente a través de la resistencia  $R$  ( $2\text{M}\Omega$ ,  $1\text{W}$ ), y al llegar al punto  $I$ , la corriente no puede atravesar la rama de la lámpara (no está cebada) y se invierte en carga el capacitor que está entre bornes  $A$  y  $B$ . Cuando la carga del condensador es tal que su tensión en bornes ( $V_{ca}$  o  $V_{cb}$ ) es igual a la de cebado de la lámpara de neón, ésta se hace conductora y el capacitor se descarga, produciendo un destello. Al descargarse el capacitor, su

tensión cae por debajo del valor de tensión de apagado de la lámpara y se desceba de nuevo, con el que el capacitor inicia nuevamente su carga, hasta que su tensión en bornes sea de nuevo la de cebado.

El tiempo que tarda en descargarse es proporcional a la tensión y al valor del capacitor, luego si se hace una relación con valores de un capacitor conocido (C), tardará un tiempo (T) en descargarse.

Y si lo quitamos el conocido y ponemos el desconocido (Cx), tardará un tiempo (Tx) entre destello y destello, de tal forma que se cumplirá si es el mismo circuito y a la misma tensión:

$$T/T_x = C/C_x$$

Ejemplo:

Con un circuito como el de la figura 52, se hicieron las siguientes medidas, 220 V, con el capacitor conocido de  $20 \mu\text{F}$  destello cada 10 segundos, con el desconocido tardó 12 segundos, calcúlese la capacidad del condensador:

$$C_x = C_x(T_x/T) = 20 \times (12/10) = 24 \mu\text{F}$$

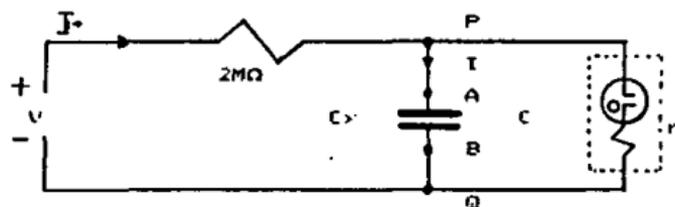


Figura 52. Medida de capacidad con lámpara de neón

Método de laboratorio: es el más preciso de los tres que se están tratando, y se utiliza un puente de Maxwell, con alimentación en alterna. El puente de Sauty (figura 59), es como el de Maxwell, pero sustituyendo las inductancias por capacitancias. Las condiciones de equilibrio son las mismas ( $i_0=0$ ), y los detectores de cero serán de alterna (galvanómetro u osciloscopio). Una vez equilibrado el puente, las ecuaciones serán:

$$R_1 \left( R_2 + j \frac{1}{C_2 \omega} \right) = R_3 \left( R_4 + j \frac{1}{C_4 \omega} \right)$$

Separando partes reales y partes imaginarias:

$$R_1 R_2 = R_3 R_4 \quad ; \quad R_1 X_C = R_3 R_4 / R_2$$

Partes imaginarias:

$$j R_1 / C_2 \omega = -j R_3 R_4 / R_2 \omega$$

$$C_2 = R_1 R_2 / R_3 R_4$$

La impedancia será:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

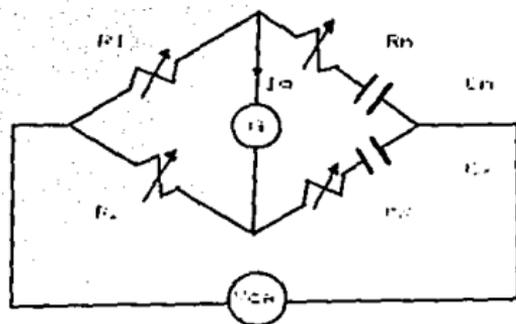


Figura 59. Medida de la capacidad con puente de Sauty

## 4.3 USO DE TABLAS Y NOMOGRAMAS

Para determinar el rango del capacitor para corregir el factor de potencia puede ser hecha con cálculos simples y también es posible usar tablas o nomogramas.

El siguiente nomograma facilita el cálculo para la potencia en vares necesarios para aumentar la potencia.

factor de potencia requerido cos  $\phi$  2

cos $\phi$ 1	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00
0.70	3.68	4.07	4.49	4.93	5.39	5.87	6.37	6.89	7.43	7.99	8.57
0.75	2.85	3.09	3.37	3.67	3.99	4.33	4.69	5.07	5.47	5.89	6.33
0.80	2.16	2.30	2.43	2.60	2.78	2.97	3.18	3.41	3.65	3.91	4.18
0.85	1.66	1.75	1.83	1.96	2.08	2.22	2.38	2.55	2.73	2.92	3.12
0.90	1.27	1.31	1.34	1.39	1.47	1.55	1.64	1.73	1.83	1.93	2.03
0.95	1.14	1.20	1.24	1.28	1.34	1.41	1.48	1.56	1.64	1.72	1.80
0.96	1.02	1.10	1.15	1.20	1.27	1.34	1.42	1.50	1.58	1.66	1.74
0.97	0.91	1.05	1.10	1.15	1.21	1.28	1.36	1.44	1.52	1.60	1.68
0.98	0.80	0.95	1.00	1.13	1.20	1.28	1.35	1.43	1.51	1.59	1.67
0.99	0.71	0.85	0.90	1.03	1.11	1.18	1.25	1.31	1.37	1.44	1.50
0.99	0.62	0.78	0.89	0.94	1.07	1.08	1.19	1.22	1.28	1.31	1.36
0.94	0.5	0.66	0.81	0.86	0.94	0.99	1.07	1.13	1.18	1.23	1.28
0.90	0.48	0.60	0.72	0.78	0.86	0.91	1.00	1.06	1.12	1.18	1.27
0.85	0.38	0.52	0.65	0.70	0.78	0.85	0.92	0.96	1.04	1.07	1.10
0.80	0.31	0.45	0.58	0.64	0.71	0.76	0.83	0.81	0.90	1.01	1.13
0.75	0.24	0.38	0.52	0.57	0.65	0.70	0.79	0.84	0.90	0.93	0.97
0.70	0.18	0.32	0.45	0.50	0.58	0.63	0.72	0.77	0.83	0.87	0.90
0.65	0.12	0.28	0.39	0.44	0.52	0.57	0.65	0.71	0.77	0.81	0.85
0.60	0.08	0.20	0.32	0.36	0.44	0.51	0.59	0.65	0.71	0.75	0.79
0.55	—	0.14	0.27	0.32	0.40	0.45	0.53	0.59	0.64	0.69	0.73
0.50	—	0.08	0.21	0.27	0.34	0.40	0.48	0.54	0.60	0.65	0.70
0.45	—	—	0.18	0.21	0.29	0.35	0.42	0.48	0.55	0.62	0.68
0.40	—	—	0.10	0.18	0.24	0.28	0.37	0.43	0.49	0.57	0.64
0.35	—	—	0.05	0.10	0.16	0.24	0.31	0.38	0.44	0.51	0.58
0.30	—	—	—	0.05	0.13	0.16	0.20	0.22	0.25	0.32	0.38
0.25	—	—	—	—	0.08	0.13	0.21	0.27	0.33	0.37	0.40
0.20	—	—	—	—	0.03	0.09	0.16	0.22	0.28	0.32	0.35
0.15	—	—	—	—	—	0.03	0.11	0.17	0.23	0.28	0.30
0.10	—	—	—	—	—	—	0.06	0.11	0.16	0.21	0.25
0.05	—	—	—	—	—	—	—	0.06	0.12	0.18	0.22
0.00	—	—	—	—	—	—	—	—	0.06	0.08	0.13
0.94	—	—	—	—	—	—	—	—	0.03	0.07	0.10
0.90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.08
0.85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.12

Figura 56. Tabla usada para calcular la potencia del capacitor.

Se traza una línea recta que une el valor  $\cos \phi$  inicial con el valor  $\cos \phi'$  final deseado. La columna central proporciona el

factor  $k$  por la que la potencia efectiva en kW debe ser multiplicada para obtener la capacidad necesaria en kvar.

Este nomograma puede ser reemplazado por una tabla de doble entrada, dando el valor del factor  $k$ . El cos  $\phi$  está mostrado como la ordenada. El cos  $\phi$  deseado como la abscisa. El factor  $k$  es leído en la intersección.

Ejemplo:

En una instalación, la carga es de 200 kW con un factor de potencia de 0.74. Un mejoramiento del factor de potencia a 0.95 es deseado, con una tensión de 220 Vca a 60 Hz.

De la tabla encontramos que el factor  $k=0.58$ .

El valor del capacitor necesario para obtener esta mejora es por lo tanto:

$$Q_c = k \cdot P \quad (\text{Vars})$$

$$Q_c = 200 \times 10^3 \times 0.58 = 116 \text{ kvar}$$

$$C = 1/k \cdot 2V^2 \times \omega$$

$$C = 116 \times 10^3 / 3 \times 220^2 \times 377 = 2.1 \text{ mF.}$$

El siguiente nomograma proporciona el mismo cálculo como el hecho previamente. Por su puesto los siguientes nomogramas son menos precisos que la tabla anterior citada. No olvidarse de que la carga eléctrica varía y de que el valor de la energía reactiva para ser compensada debe estar en un promedio de los requerimientos. Así que una gran precisión no es necesaria.

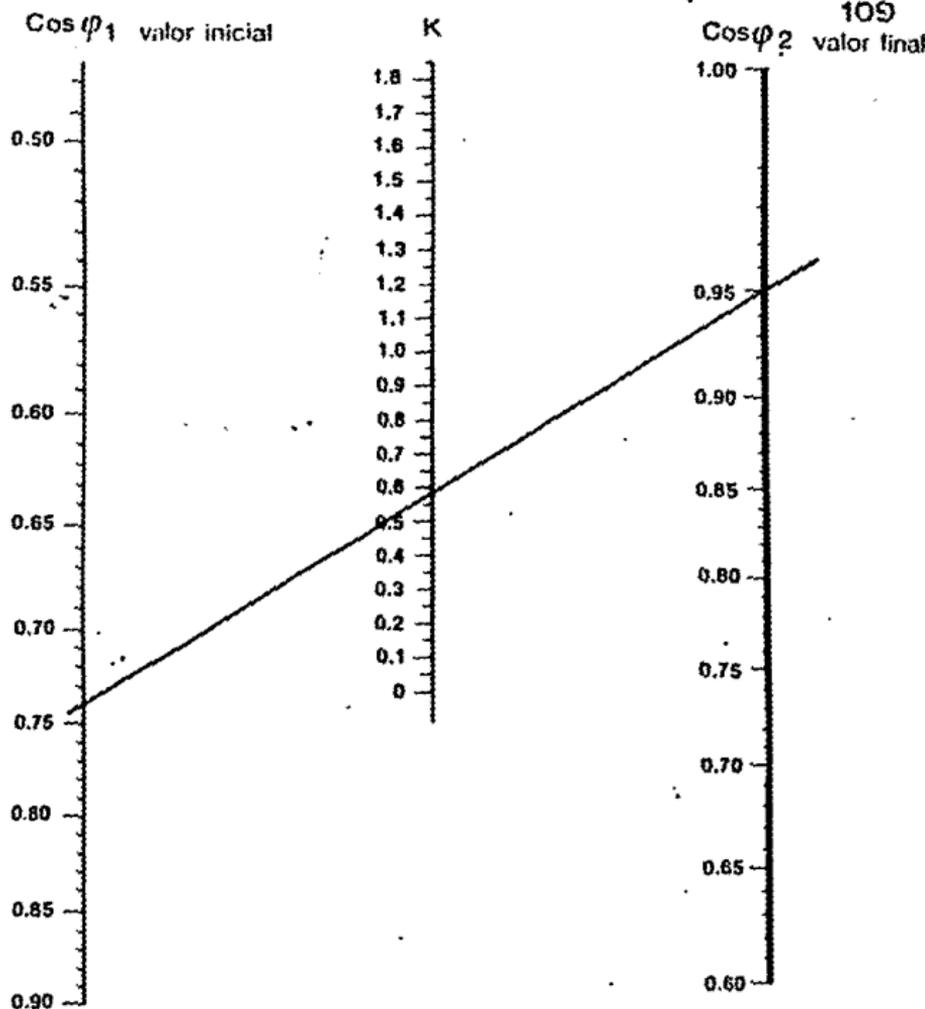


Figura 99. Nomograma para determinar la potencia del capacitor.

En este caso la  $k=0.59$  es igual que el ejercicio anterior.

Hay varios tipos de nomogramas, el de abajo permite determinar la potencia reactiva (kvar), si la potencia instalada y el valor del  $\cos \phi$  son conocidos. Utilizando el nomograma de la figura 56.

Con los datos del primer ejercicio, tenemos:

Con potencia instalada de 200 kW con un  $\cos \phi = .75$  se tiene 181 Kvar

Con 200 kW para un  $\cos \phi$  de .95 se tiene 65 Kvar, por lo tanto la potencia capacitiva =  $181 - 65 = 116$  Kvar, que es el mismo dato del obtenido en el primer ejercicio.

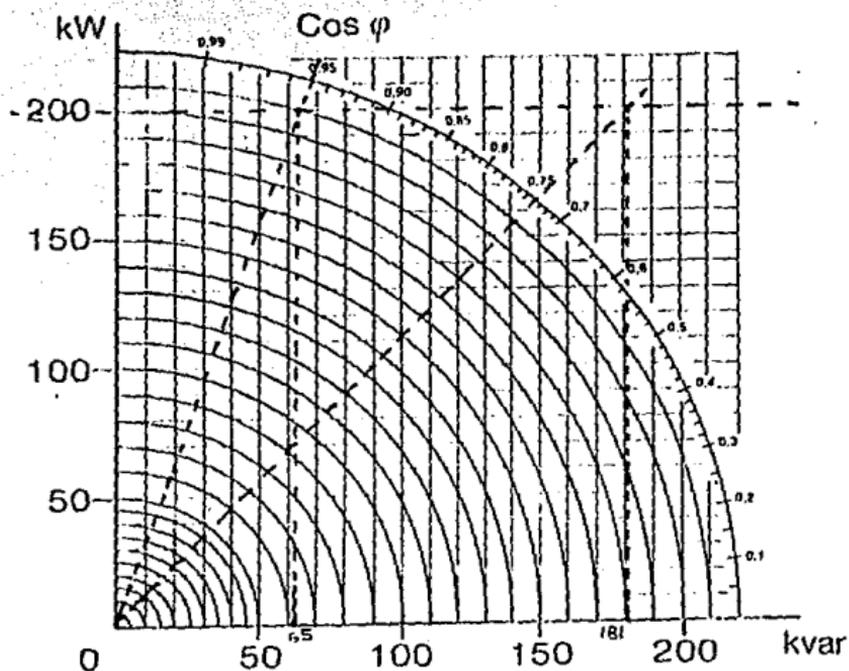


Figura 56. Nomograma para determinar valor de la potencia capacitiva utilizando la potencia instalada

El nomograma de la figura 57, también proporciona la relación entre potencias activa y reactiva, para diferentes valores de  $\cos\theta$ . Así, para 100 Kw,  $\cos\theta = .7$  a  $\cos\theta = .95$ , tenemos:

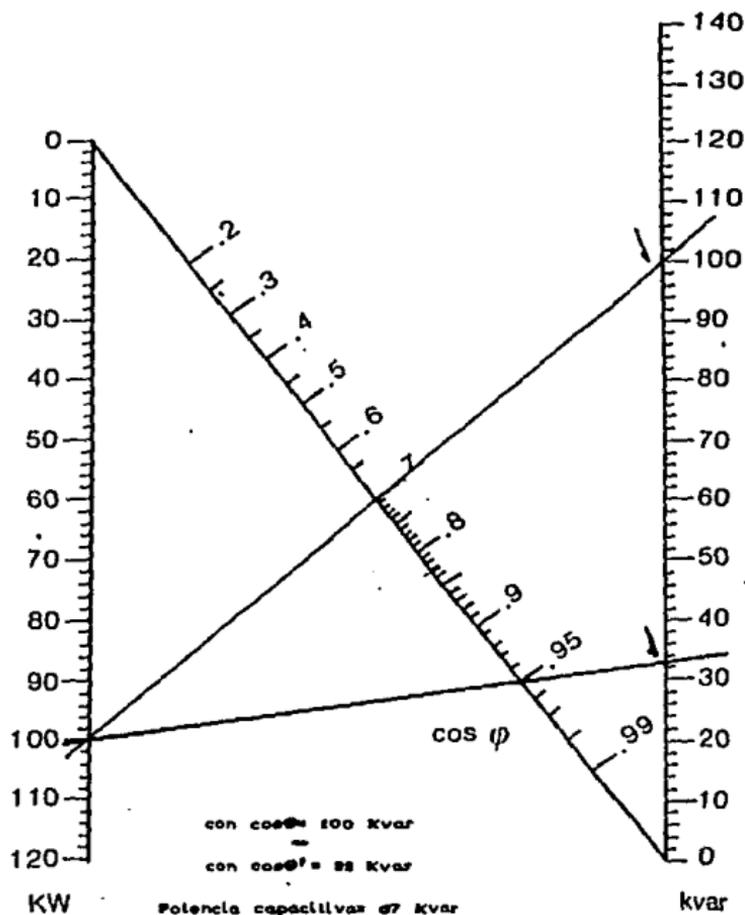


Figura 57. Nomograma para obtener potencia capacitiva Vars

Al tener el factor de potencia actual, el factor de potencia deseado, se obtiene la constante  $k$  y se multiplica por el consumo de la potencia promedio. (caso de la figura 54 y 55) obteniendo así, el valor del capacitor adecuado en Kvar. En el caso de la figura 56 y 57 nos da el valor del capacitor en Kvar en forma directa, pero para conocer la corriente, y el valor del capacitor tenemos que determinar si es monofásico o trifásico. Así tenemos:

## MONOFASICO

$$I = C \cdot n \cdot V$$

$$C = I / (n \cdot V) \times 10^3 / V$$

$$Kvar = n \cdot V^2 \cdot C \cdot 10^3$$

$$C = I^2 \times 10^3 / 2 \cdot n \cdot V^2$$

## TRIFASICO

$$2 \cdot n \cdot C \cdot V^2$$

$$Kvar \times 10^3 / \sqrt{3}$$

$$6 \cdot n \cdot C \cdot V^2 / 10^3$$

$$Kvar \times 10^3 / 6 \cdot n \cdot V^2$$

## 4.4 COMPENSACION EN MOTORES

La cantidad requerida de Kvar de los capacitores depende del valor del factor de potencia sin corrección y el valor deseado del factor de potencia a corregir.

El factor de potencia y los Kvar sin corrección, pueden ser determinados por la medición de la corriente y el voltaje de línea y el factor de potencia en el punto de corrección, para un sistema trifásico tenemos:

$$VA \text{ entrada} = \text{Amperes} \times \text{Volts} \times \sqrt{3}$$

$$P = VA \times FP \quad ; \quad P = VA \times \cos \theta$$

Los Kvar requeridos para elevar el factor de potencia hasta el punto deseado puede ser calculado como sigue:

$$\text{Kvar Capacitivos} = \text{KVA carga} = \frac{\text{KW carga}^2}{FP^2} \sqrt{1 - FP^2}$$

Ejemplo:

Si tenemos 1000 Kw carga con un  $\cos \theta = .58$  que deseamos corregir a  $\cos \theta = .9$  tenemos:

$$\text{Kvar carga} = \sqrt{(1000 / .58)^2 - (1000)^2} = 1404 \text{ Kvar}$$

entonces

$$\text{Kvar capacitivos} = 1404 = \frac{\sqrt{1 - (0.9)^2}}{(0.9)^2} \times (1000)^2$$

$$= 920 \text{ Kvar}$$

La tabla de la figura 5-4 ha sido desarrollada y está disponible para simplificar los cálculos para la fabricación de los capacitores de fuerza. Y basta con conocer la siguiente información:

1. El promedio de las tres últimas mediciones de demanda en kW
2. El promedio de los tres últimos factores de potencia (esta información puede ser obtenida de los registros de la compañía suministradora).
3. El factor de potencia deseado.

Los valores de dicha tabla son multiplicados por los kW de carga para determinar los kvar capacitivos y así obtener el factor de potencia corregido deseado.

Para la aplicación de capacitores en la corrección del factor de potencia de motores NLMH, recomienda el siguiente procedimiento basado en los datos de placa del motor eléctrico.

1. El factor de potencia a plena carga en forma aproximada puede ser calculado de los datos de placa de la forma siguiente:

$$\cos \theta = 4.31 \times (HP \div VA_{FLA})$$

donde:

- cos  $\theta$  = factor de potencia a plena carga por unidad
- HP = caballo de potencia nominal
- VA<sub>FLA</sub> = corriente nominal
- V = voltaje nominal
- $\eta$  = eficiencia del motor a plena carga por unidad

2. Por razones de seguridad, generalmente es mejor considerar el factor de potencia para varias cargas como una parte del sistema

de distribución de la planta. En esos casos donde los requerimientos locales y otras circunstancias requieren mejorar el FP, de un solo motor, el rango de Kvar del capacitor empleado puede calcularse de la siguiente manera:

$$Kvar = \frac{0.746 \times Hp}{\eta} \times \frac{\sqrt{1 - FP^2}}{FP} \times \frac{\sqrt{1 - FPI^2}}{FPI}$$

donde:

Kvar = Rango del capacitor para mejorar el factor de potencia trifásico.

FPI = Factor de Potencia corregido por unidad por la combinación motor-capacitor.

3.- En algunos casos, tal vez sea conveniente determinar la resultante del factor de potencia corregido (FPI), cuando se tenga que seleccionar el capacitor para corregir el factor de potencia, dentro de un valor máximo especificado por el fabricante del motor. La resultante del factor de potencia corregido puede ser calculado como sigue:

$$FPI = 1 + \frac{\sqrt{1 - FP^2}}{FP} - \left[ \frac{(KVAR \times \eta)}{(0.746 \times HP)} \right]^2 + 1$$

En ningún caso se aplicarán capacitores para la corrección del FP que exeda el rango límite especificado por el fabricante del motor. Una mejora considerable provocará una sobreexcitación de lo cual resultará un voltaje transitorio elevado, corrientes y pares

que pueden incrementar los riesgos para el personal, y causar posibles daños al motor o al equipo de control. Ver (NEMA MG2).

Las características de la carga del motor cíclica que varía de una carga nominal plena a una carga ligera, el valor de los Kvar capacitivos de corrección no será el que resulte de considerar el factor de potencia a ligeras cargas.

Para evitar esta posibilidad se recomienda que el valor máximo de los Kvar de corrección añadidos debe ser menor que los Kvar del motor en vacío aproximadamente un 10%. De este modo tendremos el valor máximo de Kvar del capacitor para motores trifásicos es igual a:

$$Kvar = \frac{I \times V \times \sqrt{3} \times 0.001}{1000}$$

I = Corriente de línea del motor operando en vacío.

V = Voltaje de línea del motor.

La figura 59, ilustra el cambio en el FP a diferentes cargas y los Kvar correctivos del capacitor.

Ahora bien, los capacitores para corregir el FP se debe conectar lo más próximos posibles a las cargas con bajo factor de potencia. Lo anterior se determina muy frecuentemente por la naturaleza y diversidad de la carga.

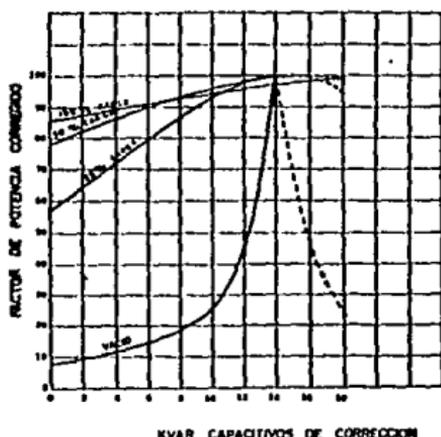


Figura 88. Corrección del FP para diferentes cargas, la línea punteada es un factor de potencia en adelanto.

La compensación individual de motores no es generalmente utilizada para cuando los valores de los motores sean menores de 10 Kw. La potencia del capacitor a conectar directamente con el motor puede ser calculado de acuerdo a uno de los siguientes métodos:

1.- El valor del motor expresado en HP es multiplicado por 1/3 para dar el rango del capacitor en Kvar, o 40% del valor en Kw puede ser tomado.

Ejemplos:

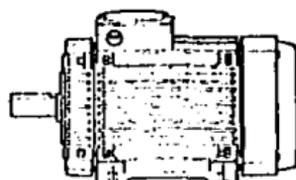
Un motor de 30 HP debe ser compensado con 10 kvar. (1/3)

Un motor de 50 Hp debe ser compensado con 20 Kvar. (40%)

2.-En la figura 59. Proporciona una tabla para estimar el factor de potencia respecto a la potencia en kW del motor, el cual varia dependiendo de su velocidad, esto es, a mayor velocidad, el factor de potencia es mayor.

\* significa la potencia en kW (1kW=1.34 HP).

\*\* su factor de potencia.



2 polos 3000 r/min		4 polos 1500 r/min		6 polos 1000 r/min		8 polos 750 r/min	
*	**	*	**	*	**	*	**
0.12	0.73	0.18	0.66	0.25	0.62	0.055	0.6
0.18	0.78	0.25	0.67	0.37	0.63	0.09	0.63
0.25	0.81	0.37	0.69	0.55	0.66	0.12	0.65
0.37	0.82	0.55	0.73	0.75	0.67	0.13	0.66
0.55	0.84	0.75	0.75	1.1	0.69	0.18	0.58
0.75	0.86	1.1	0.78	1.5	0.7	0.27	0.57
1.1	0.87	1.5	0.79	2.2	0.71	0.55	0.58
1.5	0.88	2.2	0.8	3	0.71	0.75	0.6
		3	0.81			1.1	0.64
4	0.90	4	0.83	2.2	0.77	1.5	0.66
5.5	0.90	5.5	0.84	3	0.80	2.2	0.68
7.5	0.91	7.5	0.85	4	0.80	3	0.68
				5.5	0.80		
11	0.90	11	0.83			4	0.78
15	0.90	15	0.84	7.5	0.79	5.5	0.74
18.5	0.91			11	0.80	7.5	0.74
		18.5	0.84				
22	0.91	22	0.85	15	0.80	11	0.75
30	0.91	30	0.85	18.5	0.78	15	0.78
37	0.91	37	0.85	22	0.80	18.5	0.74
45	0.92	45	0.84	30	0.86	22	0.76
55	0.92	55	0.88	37	0.83	30	0.74
75	0.94	75	0.87	45	0.81	37	0.78
90	0.95	90	0.90	55	0.83	45	0.75
100	0.93	110	0.87	75	0.84	55	0.72
132	0.94	132	0.87	90	0.83	75	0.78
160	0.94	160	0.88	110	0.85	90	0.77
200	0.93	200	0.87	132	0.85	110	0.79
250	0.92	250	0.87	160	0.86	132	0.77
280	0.95	315	0.89	200	0.88	160	0.78
				250	0.87		

Figura 59. Características de FP a plena carga de motor

3.-Si tenemos el dato de los HP del motor podemos hacer una compensación individual del mismo, utilizando las tablas de la figura 60. Que contienen las potencias máximas sugeridas de los capacitores (Kvar) para su compensación individual para baja tensión.

NEMA diseño B- par de arranque normal, corriente normal

Motor de Inducción potencia HP	Velocidad nominal en rpm y número de polos						
	3600 2	1800 4	1200 6	900 8	720 10	600 12	
5	2	2	3	3	4	5	
7 1/2	2 1/2	3	3	4	5	7 1/2	
10	3	3	4	5	6	10	
15	5	5	5	7 1/2	7 1/2	10	
20	5	5	7 1/2	7 1/2	10	15	
25	7 1/2	5	7 1/2	10	10	30	
30	7 1/2	7 1/2	10	10	10	30	
40	7 1/2	10	15	15	15	25	
50	10	15	20	20	20	30	
60	10	15	25	20	25	35	
75	15	20	25	25	30	40	
100	20	25	30	30	35	45	
125	25	30	30	40	40	50	
150	25	30	35	45	50	60	
200	35	40	50	60	70	80	
250	40	50	60	70	80	100	
300	45	60	70	80	90	110	
350	50	70	80	100	100	125	
400	70	70	80	110	125	150	
450	75	80	100	120	125	150	
500	90	90	120	125	140	175	

NEMA diseño C- alto par de arranque, corriente normal

Motor de Inducción potencia HP	Velocidad nominal en rpm y número de polos			
	1800 4	1200 6	900 8	720 10
5	2	2 1/2	4	--
7 1/2	3	3	4	--
10	3	4	6	--
15	4	5	7 1/2	--
20	4	5	7 1/2	--
25	5	5	10	--
30	5	7 1/2	10	30
40	10	10	15	--
50	15	10	20	30
60	15	20	25	35
75	20	20	30	40
100	25	25	40	40
125	30	25	40	45
150	35	40	45	50
200	45	50	60	60
250	50	60	75	75
300	60	70	80	80
350	70	75	90	100

Figura 60. Tabla de compensación individual de motores de B. T.

4.-La corriente capacitiva no debe de exceder 90% de la corriente sin carga. La corriente sin carga de hojas de datos del fabricante de motores. Puede también ser medida directamente sobre un motor sin carga. Una buena estimación es usualmente obtenida tomando 1/3 de la corriente nominal.

Ejemplo: Un motor trifásico de 11 Kw se alimenta de de una red de 220 V, 60 Hz, la corriente sin carga es 7.5 A.

Corriente capacitiva igual a  $0.9 \times 7.5 = 6.75$  A.

Valor del capacitor.

$$\mu\text{FVI}/1000 = 1.73 \times 220 \times 6.75 / 1000 = 2.57 \text{ kvar}$$

8 4 9 3 7 2 2 0 2 3 7 8 0

BANCO DE CAPACITORES

### 5.1 CAPACITOR RECOMENDADO

Capacitor autorregenerable con dieléctrico seco.

En cada fase se conecta una o más celdas monofásicas. Dichas celdas están en paralelo y formando una delta entre las fases.

Las celdas están fabricadas a partir de una película de polipropileno metalizada como sistema electrodo/dieléctrico integrado y son además secas, es decir, no contienen ningún tipo de líquido de impregnación.

Autorregenerable significa que un capacitor, tras una perforación, regenera su capacidad de aislamiento rápidamente y sin daño permanente.

Esta capacidad se consigue por medio de electrodos sumamente delgados metalizados en vacío sobre la capa aislante.

Una perforación resultante de una sobretensión anormal o de un punto débil en el dieléctrico no tiene por consiguiente, como resultado un corto circuito permanente como en el caso del capacitor de láminas metálicas. En realidad, la vaporización del material de los electrodos en torno a la perforación aísla el lugar de la falla y el capacitor puede seguir funcionando correctamente figura 61.

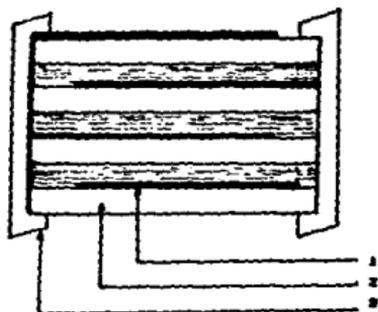
Contiene una protección de Vermiculita. Es un granulado mineral inerte y no flammable que sirve de envoltente a las celdas y que rellena todo el contenido de la caja en que están colocadas.

Este material ocupa todo el espacio entre las celdas y la caja como se ilustra en la figura 62, sirviendo como aislante y desplazando todo el oxígeno libre que pueda existir. Al ser comprensible absorbe toda la energía expansiva en caso de una

permite explosion.

Los capacitores presentan en la parte superior grandes terminales con ausencia de porcelana (fácilmente quebradiza), que permite una rápida y más fácil conexión con los cables del exterior. Existe también un borne de tierra debidamente señalado.

Estructura de principio de un capacitor de baja tensión.  
1-electrodo metalizado en vacío  
2-capa aislante  
3-capa de contacto



Capacitor con baja tensión con perforación tras el proceso de autorregeneración.  
1-canal de la perforación  
2-parte perforada de los electrodos (no puede saltar el arco).

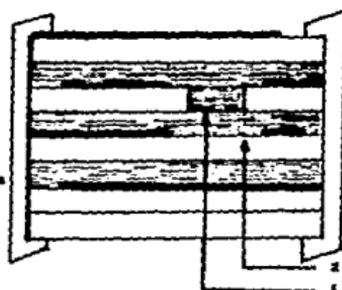


Figura 61. Características constructivas del capacitor

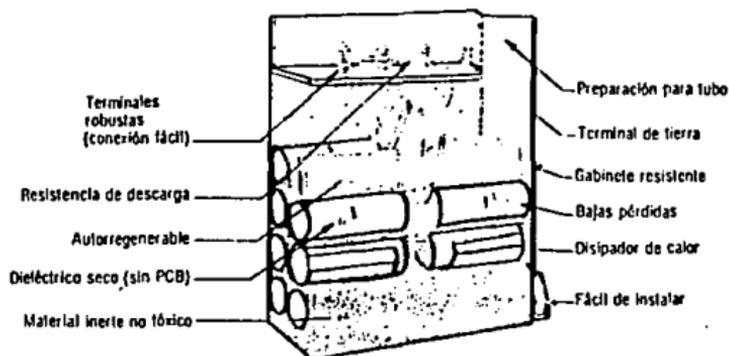


Figura 02 Componentes del capacitor autorregenerable.

## 5.2 INSTALACION DE CAPACITORES

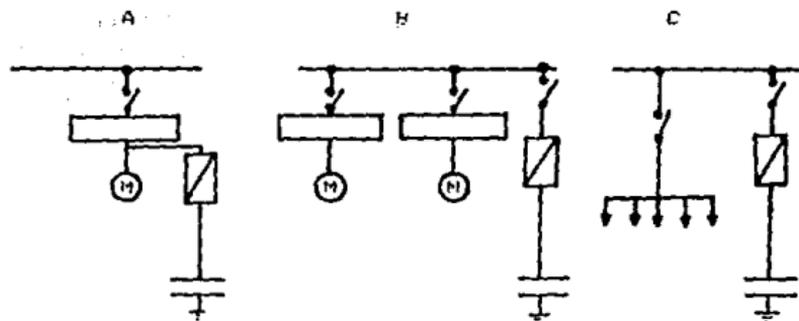
Los capacitores para la corrección del FP, se colocarán eléctricamente lo más cercanos posible a las cargas de bajo factor de potencia. En algunos casos, los capacitores pueden ser localizados en un cable de alimentación. En otros casos, cuando se trata de motores de gran potencia, los capacitores pueden ser conectados lo más cercanos posibles a las terminales del motor. Los capacitores también son conectados entre las líneas de energía, en paralelo con la carga de bajo factor de potencia.

Los puntos más estratégicos para la instalación de capacitores dentro de una instalación son los siguientes:

- 1.-En los terminales del motor
- 2.-En las terminales principales de un banco de motores
- 3.-En el centro de distribución o en la ramificación del mecanismo de alimentación.

ABB nos indica que las unidades capacitivas pueden ser instaladas en varios puntos en la red de distribución en una planta. Cuatro tipos principales de instalaciones pueden distinguirse.

- A) compensación individual
- B) compensación en grupo
- C) compensación central
- D) compensación combinada



#### MÉTODO DE COMPENSACION INDIVIDUAL

Características: aplica a los dispositivos bajo condiciones de carga continua, cada uno conectado a un capacitor de valor apropiado.

Ventajas: evitar producido en el punto, reducción de pérdidas de línea y caída de voltaje, ahorro de un dispositivo de conmutación.

Desventajas: costo de los capacitores pequeños separado, más que un

capacitor individual del valor total equivalente; factor de utilización del capacitor para dispositivos no conectados con frecuencia.

#### METODO DE COMPENSACION EN GRUPO.

Características: dispositivos separados son conectados a un capacitor común con su propio interruptor.

El capacitor es usado de acuerdo a las veces en que las cargas están en uso.

Ventajas: reducción de los costos de inversión de capital para capacitores, pérdidas y caídas de voltaje reducidas en las líneas de distribución.

Desventajas: carga no aliviada sobre las líneas de alimentación principales.

#### METODO DE COMPENSACION CENTRAL.

Características: producción de potencia en un punto solamente. en caso sencillos, el banco es conectado en el inicio y desconectado al final del trabajo.

Ventajas: mejor utilización de la capacidad de los capacitores, supervisión fácil, control automático puede considerarse, mejoría general del nivel de voltaje.

Desventajas: carga no aliviada sobre la fuente principal y las líneas de distribución.

#### METODO DE COMPENSACION COMBINADO.

Características: compensación individual de dispositivos de carga muy grandes.

Compensación central o de grupo para otros dispositivos.

Cuando la potencia reactiva necesaria es variable, la compensación central frecuentemente involucra bancos automáticos de capacitores.

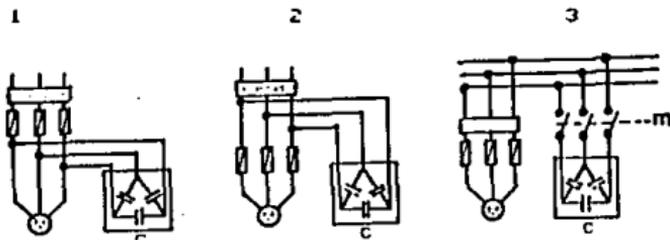
Compensación central es siempre usada para mejorar el factor de potencia en instalaciones existentes.

Para la conexión de capacitores en motores de inducción con arranque directo, existen tres formas:

1. Antes de la protección térmica del motor. El capacitor es conectado simultáneamente con el motor. Solo la potencia activa pasará a través de la protección térmica y su valor debe, por lo tanto, ser reducida adecuadamente. La potencia reactiva necesaria para el motor es directamente alimentada del capacitor.

2. Antes de la protección térmica del motor y con energización del capacitor a los motor simultáneamente. El valor de la protección térmica del motor no debe ser reducido; este método es el más útil para conseguir compensación en una planta existente a bajo costo.

3. Conexión permanente de capacitores a una red de carga. El valor de la protección térmica para el motor no es reducido. Esta instalación requiere protección con fusibles y un interruptor para el capacitor solo.



### 5.3 BANCO AUTOMÁTICO DE CAPACITORES

Al instalar los capacitores para la corrección del factor de potencia y obtener un FP de 90%, evita el cargo por las compañías suministradoras. La forma común de efectuarlo, es efectuarlo por medio de 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, reduciendo con esto, su vida útil al envejecer paulatinamente los aislamientos.

En las horas de descanso existen variaciones fuertes de carga, que provocan sobrevoltaje y sobrecompensación si no desconectan los capacitores. Para solucionar este problema se utilizan los bancos de capacitores, el cual está formado por los siguientes elementos:

1.-Regulador automático de VAR'S, figura 63.

El cual tiene 5 funciones:

- a) Determinar el FP deseado, para lo cual, mide la potencia reactiva necesaria y controle la conmutación (conexión) de los diferentes pasos de capacitores, de acuerdo al factor de potencia deseado.
- b) Medición del factor de potencia ( $\cos\phi$ ). Para lo que sense los valores de corriente y de voltaje.
- c) Ajuste del  $\cos\phi$  deseado. Esto se realiza por medio de un control, colocado en la carátula del regulador y graduado en valores de  $\cos\phi$  (0.7 inductivo a 0.95 capacitivo).

depende de la sensibilidad, de acuerdo al TC y los valores de potencia reactiva de cada paso.

El cuenta con indicadores 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 con el transitorio de voltaje.

El ajuste  $C/I$  se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$C/I = 360 \text{ U/V}$$

Donde:

U = valor de un paso en Kvar

V = voltaje nominal del sistema

I = relación del transformador de corriente.

Tiempo:

$$T = 5000 / S \times 100$$

Banco: 5x30 Kvar, 220 V

$$C/I = 360 \times 30 / 220 \times 100 = 49 \text{ segundos}$$

Secuencia de conexión:

Existen tres tipos principales:

a) Adición. El primer capacitor es siempre conectado tan pronto como exista una demanda. El segundo, tercero, etc., son conectados cuando la demanda aumenta y viceversa, esto es repetido como 1.1.1.1.1.

b) Progresión. El banco incluye capacitores con valores diferentes que son múltiplos del primer paso, por ejemplo: 1-2-4 etc.

El paso 1 está en la primera demanda, si la demanda aumenta, el

paso 2 es conectado y el paso 1 es desconectado. Un problema puede aparecer por la conexión de un capacitor con 4 veces la unidad de potencia, pero esto puede ser reducido con un capacitor con secuencia 1-2-2.

c) Rotación. Los métodos precedentes sólo permiten aumentos y ciertos capacitores (por ejemplo, el primero), están con mucha frecuencia conectados, con respecto a los otros.

Demandas: conecte 1

Nueva demanda: conecte 2

Reducción: desconecte (no es el 2 como en la secuencia de adición).

2.- Interruptor termomagnético general de la capacidad adecuada.

Cuya función es proteger de manera general todo el banco de capacitores. Para su selección ver tema 3.5 en la tabla referente a las normas NIEE, PARTE I SECOPFI-DGN.

3.- Contactores. Los cuales son controlados por el regulador VAR'S y su propósito es conectar y desconectar los pasos de capacitores. Los cuales se observan en la figura 64.

Mecánicamente: Para tener una gran cantidad de operaciones.

Eléctricamente: Para resistir la corriente transitoria de conexión. .

4.- Fusibles. (ver figura 64). Su función es la de proteger a cada capacitor, independientemente de la protección que les brinda el interruptor general. Para su selección ver tema 3.5 referentes a las NORMAS TÉCNICAS PARA INSTALACIONES ELÉCTRICAS, PARTE I SECOPFIN-DGN.

5.- Banco de capacitores. (figura 62) Formado por 5 unidades, previo cálculo (para el caso más común del banco automático de 5 pasos).

Cada capacitor cuenta con resistencias, las que lo descargan cuando este se desconecta, a un valor de 50 Volts en aproximadamente 1 minuto.

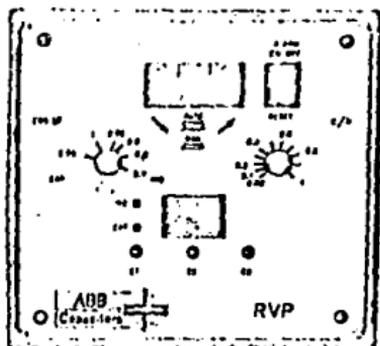


Figura 03. fotografía de un regulador Var

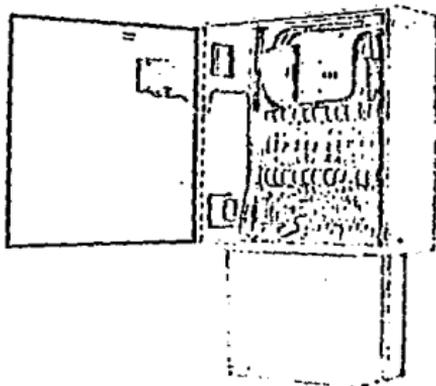


Figura 04. Banco automático de capacitores ABB.

En el siguiente diagrama se muestra el alambrado de un banco de 3 pasos ABB (Figura 65).

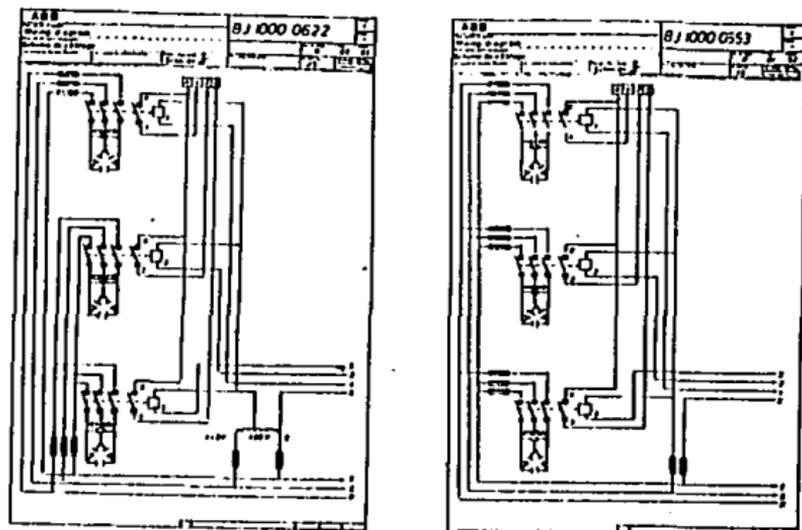


Figura 65. Diagrama de conexión de un banco de 3 pasos

#### 5.4 DISPOSITIVOS DE DESCARGA

Propósito.

Cuando un capacitor es desconectado de la red, este permanece cargado. Debido a sus excelentes propiedades de aislamiento, esta carga permanecerá por un largo tiempo después de la desconexión. Hay un riesgo sustancial de descarga eléctrica.

Esta es la razón del porqué en las diferentes normas nacionales e internacionales hay regulaciones del porqué un capacitor debe

estar provisto con un dispositivo de descarga apropiado. La sección apropiada de la publicación 70 del IEC (1967) se explica a continuación.

#### 4. DISPOSITIVOS DE DESCARGA.

4.1 CADA CAPACITOR SERA PROVISTO CON UN DISPOSITIVO DE DESCARGA CONECTADO DIRECTAMENTE, A MENOS QUE ESTE ESTE CONECTADO DIRECTAMENTE A OTRO EQUIPO ELECTRICO PROPORCIONANDO UN CAMINO DE DESCARGA SIN TENER EL INTERRUPTOR CONECTADO, CORTE DE FUSIBLES O CAPACITORES EN SERIE INTERPUESTOS.

4.2 EL DISPOSITIVO DE DESCARGA O EL EQUIPO ELECTRICO CITADO EN 4.1, REDUCIRA EL VOLTAJE RESIDUAL DEL VALOR DE CRESTA DEL VOLTAJE NOMINAL 50V O MENOS EN UN TIEMPO DADO DESPUES QUE EL CAPACITOR SEA DESCONECTADO DE LA FUENTE DE ALIMENTACION. ESTE TIEMPO ES 1 MINUTO PARA CAPACITORES HASTA 600V, Y 5 MINUTOS PARA CAPACITORES DE VOLTAJES NOMINALES ARRIBA DE LOS 600V.

nota: CUANDO LOS CAPACITORES ESTAN CONECTADOS EN SERIE EL DISPOSITIVO DE DESCARGA INSTALADOS EN CADA UNIDAD PUEDE NO SER ADECUADO PARA CUMPLIR CON ESTA CLAUSULA. POR EL EFECTO ACUMULATIVO DEL VOLTAJE RESIDUAL.

SI LA FUENTE DE VOLTAJE ES TAN ALTA QUE ESTE OCURRE, ENTONCES UN DISPOSITIVO DE DESCARGA EXTERNA ADICIONAL, SERA NECESARIO Y DEBERA ESTAR DIRECTAMENTE CONECTADO AL BANCO DE CAPACITORES.

4.3 COMO LOS CAPACITORES PUEDEN SER DESCONECTADOS O CONECTADOS EN INTERVALOS MUY CORTOS, ARREGLOS SERAN HECHOS DE TAL MODO QUE EL MOMENTO DE REAPLICACION DE VOLTAJE, EL VOLTAJE EN LAS TERMINALES NO SERA MAYOR DEL 10% DEL VOLTAJE NOMINAL rms.

4.4 UN DISPOSITIVO DE DESCARGA NO ES UN SUSTITUTO PARA EL CORTO CIRCUITO DE LAS TERMINALES DEL CAPACITOR Y PARA ATERRIZAR ESTE ANTES DEL MONTAJE MANUAL.

nota: LA CARGA RESIDUAL ALGUNAS VECES PUEDE ESTAR EN LAS INTERCONEXIONES DE LOS CAPACITORES CONECTADOS EN SERIE DEBIDO A LOS FUSIBLES FUNDIDOS, INTERRUMPIENDO LAS CONEXIONES INTERNAS, O UN COMPORTAMIENTO NO LINEAL DEL DIELECTRICO RESULTADO DE LAS SOBRETENSIONES. ESAS INTERCONEXIONES SERAN CORTOCIRCUITADAS A TIERRA ANTES DE LA MANIPULACION.

El voltaje sobre las terminales de un capacitor descarga a través de una resistencia y disminuye exponencialmente con el tiempo.

Matemáticamente, la expresión de esta disminución está dada por:

$$V/V_0 = e^{-t/RC}$$

$V_n$  Voltaje sobre los terminales en el tiempo  $t$

$V_0$  Voltaje en el instante de desconexión ( $t=0$ )

El circuito de descarga está mostrada en la figura 65.

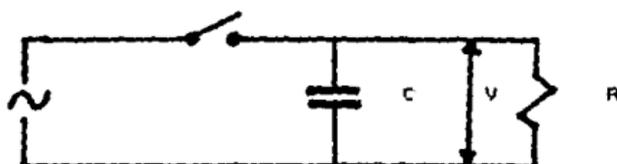


Figura 65. circuito de descarga.

Para incluir la tolerancia en los valores de voltaje y resistencia, el voltaje nominal debe aumentarse un 10%.

Aplicando la fórmula anterior y las regulaciones del IEC, publicación 70, tenemos:

$$50 = 1.1 V_n \sqrt{2} \times e^{-0.01/RC}$$

El valor de 50 se obtiene de la gráfica de la figura 66 que es la máxima disminución de voltaje de 50 V después de 1 minuto.



Figura 66. relación del voltaje y tiempo de un capacitor

La fórmula de el producto de la resistencia y la capacitancia como una función de voltaje:

200 V	RC=20.5	500 V	RC=21.9
400 V	RC=23.9	600 V	RC=20.5
415 V	RC=23.5	660 V	RC=19.9
480 V	RC=22.2		

Con C expresada en  $\mu$  y R será expresado en ohm.

Ejemplo: Supongamos que necesitamos determinar la resistencia por fase para un capacitor trifásico, de 40 kvar/415V-50 Hz.

Cálculo de C por fase

$$Q = 3 \times \omega \times C \times V^2$$

$$C = (Q / 3 \times \omega \times V^2) = 43.000 / 3 \times 2 \times 3.1416 \times 50 \times 415^2$$

$$= 265 \mu$$

$$R = 23.5 / 265 = 0.089 \text{ M}\Omega \text{ ó } 89 \text{ k}\Omega$$

Potencia de las resistencias. En el campo habrá pérdidas óhmicas en las resistencias de descarga. Cuando calculamos la potencia de la resistencia es necesario considerar las fluctuaciones normales del voltaje en el voltaje de la red.

La potencia disipada es igual a:

$$P = (V \times I) \times R$$

En donde:

P=potencia en Watts (W)

V=voltaje en la red (V)

R=resistencia ( $\Omega$ )

La relación de la resistencia para el capacitor en el ejemplo anterior debe ser:

$$P = (415 \times 1.1)^2 / 69.000 = 2.3 \text{ W}$$

En un banco automático, los capacitores son conectados y desconectados regularmente. Los intervalos entre esas operaciones son una función de las características del regulador de Vares. Usualmente este tiempo es muy corto, del orden de los 12 segundos. Para evitar conectar los capacitores aún cargados, lo cual puede causar muy altas corrientes transitorias, es común equipar los bancos automáticos con resistencia para descarga rápida. Para hacer esto los dos contactos auxiliares (normalmente cerrados) del contactor puede ser usados. Con esos contactos auxiliares es posible conectar dos resistencias de descarga a través del capacitor cuando el voltaje es desconectado (Figura 67).

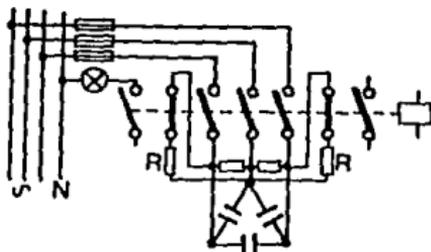


Figura 67. Conexión de resistencia de descarga rápida.

Las resistencias deben ser diseñadas para dar la descarga deseada en 20 segundos teniendo en mente que hay solo dos resistencias, obtenemos:

200V	RC=4	400V	RC=2.0
400V	RC=1.1	500V	RC=2.0
415V	RC=3	600V	RC=2.5

En donde C es la capacitancia de fase.

Con la consideración para la relación de potencia de esas resistencias es común seleccionar un valor cerca de la mitad del usado para una resistencia conectada permanentemente pero las resistencias nunca están energizadas. Ellas solo disipan la energía de descarga de los capacitores.

#### 5.5 EJEMPLO INDUSTRIAL

Tomé los datos de Área de trabajo mostrado en el diagrama de la figura 6.0. los cuasas están en servicio 3,000 horas por año. La potencia reactiva por las Áreas de trabajo es como sigue:

$$\text{Área de trabajo} = 80 \left[ \frac{\sqrt{1-0.75^2}}{0.75} \right] = 70 \text{ Kvar (taller A)}$$

$$\text{Área de trabajo} = 170 \times 0.98 = 149.5 \text{ Kvar (taller B)}$$

para un total de 220 Kvar

La potencia reactiva del transformador es tomada para propósitos de tarifa fija como del 13% de potencia usada: 32.5 kvar.

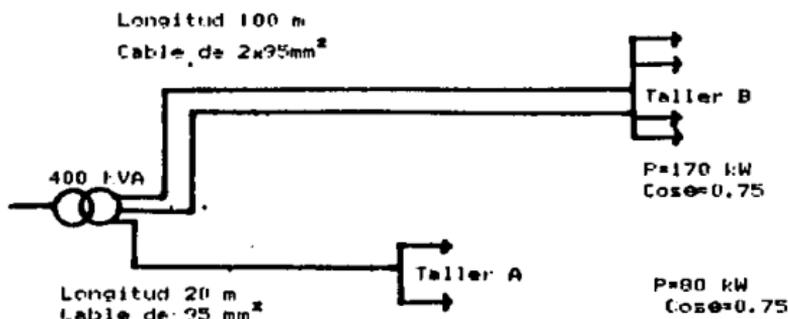


Figura 48. Esquema de una pequeña industria

Así la potencia total demandada de la fuente es:

$$220+32.5=252.5$$

El resultado es que:

- Existen pérdidas excesivas de energía activa en el cableado
- La carga sobre el transformador de distribución es muy pesada
- El costo en energía reactiva es excesiva.

Capacitores deben, por lo tanto, ser instalados para reducir el  $\text{cos}\phi$  en las áreas de trabajo, a un 0.9 que es el actual permitido por las compañías suministradoras de energía.

Llevando  $\text{cos}\phi$  de 0.75 a 0.9, obtenamos de la tabla de la figura 54 una  $k=0.4$ .

En el Área A instalamos  $80 \times 0.4 = 32 \text{ Kvar}$  y

en el Área B instalamos  $170 \times 0.4 = 68 \text{ Kvar}$

Para un total de  $32+68=100 \text{ Kvar}$ .

## BIBLIOGRAFIA

Métodos Experimentales para Ingenieros

Jack E. Holman 4 Ed.

Mc. Graw-Hill

Manual de Pesas y Medidas

1988 Lemaire

Manual YLM IM 2041-01E

Manual YLM IM 2039-01E

Catálogo BU-YU-UI SF

A.B.B.

Catálogo A.B.B. - Capacitores

Catálogo A.B.B. - Capacitores

Revista Técnica I.E.M

Diciembre 1983

Norma Oficial Mexicana

NUM. 1 DE 1981

"Watt-hourmeters Monofasicos Especificaciones"

Instalaciones Eléctricas Conceptos básicos y Diseño

H. Bretó E. Lemerc

El Alfaomega

Instalaciones Eléctricas Prácticas

Ing. Becerril L. Diego O.

11a. Edición

Electricidad

Abraham Marcus

Ed. Diana

Tecnología de Electricidad

Florez Juan José

Ed. Paraninfo S.A.

Manual de Formulas Eléctricas "Símbolos y Definiciones"

John R. Brand.

Ed. C.E.C.S.A.

Análisis de Medidas Eléctricas

Ernest Frank

Mc. Graw-Hill

Tratado de Electricidad Tomo Segundo " Corriente Alterna "

Chester L. Dawer

R. Gill S.A. de C.V.

Teoría de las Maquinas de Corriente Alterna

Alexander G. Langsdorf

Mc. Graw-Hill