

0227

U N A M

"Estudio y Diseño de Condensadores  
Estáticos Industriales para Mejorar  
el Factor de Potencia."

TESIS PROFESIONAL

CLAUDIO P. GOMEZ VUISTAZ

MEXICO

1955



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE INGENIERÍA  
Dirección  
Núm. 731-2566 T  
Exp. Núm. 731/214.2/-2110

Al Pasante señor Claudio Pablo GOMEZ VUISTAZ  
P r e s e n t e .

En atención a su solicitud relativa me es grato transcribir a usted a continuación el tema que aprobado por esta Dirección, propuso el señor profesor ingeniero José Luis Rubio S., para que lo desarrolle como tesis en su examen profesional de Ingeniero MECANICO ELECTRICISTA.

"Estudio y diseño de condensadores estáticos industriales para mejoramiento y corrección del factor de Potencia.

El estudio comprenderá los siguientes puntos principales:

- a)- Diferentes métodos para mejorar el factor de potencia.
- b)- Factores que intervienen en el diseño de condensadores estáticos.
- c)- Selección y diseño del tipo de condensador más adecuado para México.
- d)- Anteproyecto de fabricación."

Ruego a usted tomar debida nota de que en cumplimiento de lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar su examen profesional.

Muy atentamente.

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
México, D.F. 11 de Octubre de 1956  
EL DIRECTOR

JBS:RFV:mbag.

Ing. Javier Barra Sierra

A maman

avec tendresse

A mi padre

con afecto

## INTRODUCCION

El estudio de capacitores y sus aplicaciones es sumamente extenso y podría abarcar desde investigaciones de los campos electrostáticos hasta resúmenes de experimentaciones alrededor de materiales dieléctricos, desde el condensador de mica, hasta el condensador síncrono, desde investigaciones teóricas hasta aplicaciones prácticas.

El propósito fundamental de esta tesis es el de establecer y diseñar los tipos de condensadores estáticos - también llamados capacitores - para corregir el factor de potencia, mas apropiados al uso de la industria mexicana .

Los capacitores reducen el costo de aprovechamiento de energía eléctrica, reducen el costo de instalaciones al disminuirse el tamaño de conductores necesarios o - bien, para una instalación ya hecha, aumentan la cantidad de energía aprovechable; elevan el nivel de tensiones transmisibles, reducen las pérdidas de distribución de corriente eléctrica e incrementan la regulación de voltaje.

En distribución urbana y en industrias medianas son practicamente la única solución económica a los problemas de aprovechamiento de energía eléctrica y a las tarifas

de castigo por bajo factor de potencia.

La ganancia en energía aprovechable, al mejorar el factor de potencia global de una industria, paga varias veces el gasto inicial de los capacitores instalados.

Por todas estas razones, sería muy útil que se instalara en el país, una fábrica de capacitores industriales, aprovechando los materiales nacionales de que disponemos o bien que una de las fábricas de productos eléctricos ya existentes, dedicara una parte de sus recursos y maquinaria en producir estos artículos. En estos momentos está en proyecto la instalación de una fábrica en la capital, pero no entrará en su fase de producción antes de 1956.

En el estudio que emprendo a continuación, estableceré las bases preliminares de un proyecto de fábrica, dedicada a la producción mencionada de capacitores industriales.

El estudio económico y práctico final de una fábrica de este tipo está realmente fuera de mi alcance actual por carecer de una experiencia y de conocimientos que, solo la práctica, me podran dar al correr de los años.

Por eso ruego a mis lectores me perdonen los errores o las omisiones que puedan encontrar en el transcurso de esta breve exposición.

### BREVES DATOS HISTORICOS

Esta chispa que salta de nuestros dedos al switch de la pared, a la agarradera del camion o del carro en un día seco es un recuerdo de que poseemos capacitancia eléctrica, o sea la propiedad de almacenar carga eléctrica o energía. Es la propiedad de dos conductores cualesquiera separados por un aislamiento. La carga, en este caso, se obtuvo por fricción con el suelo. Existe carga e capacitancia entre nosotros y el gato cuando acariciamos su peleje y surgen chispas, entre una nube tormentosa y la tierra, entre un automóvil y la carretera. Hay capacitancia entre los conductores de una línea, entre estos y tierra; en bobinas de inductancia, transformadores, motores, reactores, etc., la capacitancia distribuida entre vueltas de alambre modifica la inductancia ideal o geométrica de estas. En líneas telefónicas y en cables, la capacidad distribuida tiene el efecto indeseado de permitir el paso de altas frecuencias de unos a otros y, por lo tanto; de interferir en la buena transmisión de un mensaje.

Por lo contrario, en circuitos electrónicos, -

en subestaciones, en motores monofásicos, en la industria necesitamos obtener capacitancia concentrada, en cantidad determinada, controlada y convenientemente almacenada. Los capacitores sincrónicos o bien los capacitores estáticos nos dan la solución a estas necesidades.

La idea fundamental de "condensador" data aproximadamente de la creación de la jarra de Leyden en 1745. Por muchos años los investigadores y aficionados en problemas eléctricos lograron producir cargas eléctricas pero en cantidades ínfimas, inestables y transitorias. Por fin, con la jarra de Leyden se obtenía un aparato capaz de almacenar una cantidad apreciable de carga eléctrica en un espacio reducido. Por esta razón Volta en 1782 llamó a estos elementos : " condensadores". La invención de la jarra de Leyden enfocó la atención hacia la idea de almacenar carga eléctrica. La jarra de Leyden original consistió en un frasco de vidrio, parcialmente lleno de agua, y tapado con un tapón de corcho a través del cual pasaba una aguja hasta tocar la superficie del agua. El agua formaba uno de los electrodos, el otro siendo la mano que sostenía el frasco. Estudios posteriores llevaron al Sr. J.H. Winckler de Leipsig a descubrir que una cadena podía substituir al electrodo formado por la mano. Poco tiempo después, en 1746, el Dr. John Bevis de Londres, cubrió el interior y exterior del frasco con hojas de plomo, creando así el prototipo de los capacitores modernos o sea : dos electrodos metálicos de superficie relativamente grande y separados por un dieléctrico de espesor uniforme.



No fué hasta 1880 que se usaron los condensadores de manera comercial en telégrafos. Posteriormente se usaron en telefonía. Durante gran parte del siglo XIX y hasta la fecha, las investigaciones se reportaron sobre las propiedades y comportamiento de capacitores y dieléctricos. Los trabajos de Michael Faraday fueron notables en este campo. Varios investigadores habían observado que la habilidad de un condensador para almacenar carga dependía de cierta propiedad específica del dieléctrico. Faraday hizo un estudio sistemático de esta propiedad y la llamó "capacidad inductiva específica" o bien "Constante Dieléctrica". Mas que cualquier otro factor, la naturaleza y condición del dieléctrico determinan el carácter de un condensador .

Materiales dieléctricos tan diversos como la parafina o la membrana de viscera de buey fueron sujetos a experimentación . En 1845 se creó un condensador formado con mica y estaño apilados en capas . En 1876 apareció un condensador formado por capas de conductor y papel enrollados en un cilindro impregnado en parafina. En 1893 los condensadores de papel parafinado se utilizaron en circuitos de potencia pero se calentaban tanto que debieron ser suprimidos .

La producción en escala comercial de capacitores no se hizo realmente antes de los años treinta, gracias al advenimiento de dos materiales dieléctricos fundamentales: el papel Kraft y los aceites impregnantes sintéticos como el Askarel, el Elsmex de la "Line Material", el Pyrenol de la "General Electric", el Inertenn de la "Westinghouse", el

Acceclor de los "Ateliers Electricques de Charleroi", etc... estudiados y puestos en práctica per los distintos manufactureros americanos y europeos citados.

Los condensadores también llamados capacitores, se hacen en variedad de tamaños y materiales como la mica, el papel, la porcelana; líquidos como los aceites minerales, los aceites sintéticos, resinas, electrolitos; gases, aire e inclusive el vacío.

Se fabrican para toda clase de usos especiales como :

- a) El calentamiento por altas frecuencias o de inducción, acoplados a generadores rotatorios de 1000 a 10,000 ciclos por segundo para fundición, endurecimiento de superficies de acero, fabricación de aceros inoxidables, soldadura, etc.. Para frecuencias mayores (200 a 530 kilociclos por segundo) se acoplan con circuitos electrónicos.
- b) Almacenamiento de energía eléctrica. Se cargan con corriente continua y luego se descargan en un tiempo y cantidad controlados, generalmente con alto voltaje y alta corriente de corta duración. Se utilizan en soldadura por descarga, pruebas de impulso, rayos X, fotografía, espectrografía, botatrones, etc...
- c) Circuitos electrónicos industriales con condensadores de pequeño tamaño para filtraje

e bloqueo de corrientes continuas, paso de altas frecuencias, estabilización de circuitos, selección de frecuencias, acoplamiento, etc..

- d) Protección de máquinas rotatorias donde los capacitores se usan para absorber el choque de la onda de pico provocado por cortos circuitos o interrupciones en líneas conectadas a motores o generadores y que pueden dañar al devanado.
- e) Los capacitores se emplean para reducir la demanda de energía eléctrica porque al entregar kilovars capacitivos compensan la corriente magnetizante de los motores, transformadores, reactores, etc.. y por lo tanto disminuyen la demanda de corriente de la alimentación. Menos corriente significa menos KVA o sea menos carga en los transformadores alimentadores. Esto significa que los capacitores permiten reducir la sobrecarga de una instalación ya hecha o bien permiten añadir carga en un sistema establecido.
- f) Ayudan a incrementar el voltaje en una línea de transmisión al reducir las caídas de tensión debidas a la reactancia inductiva. Incrementan por lo tanto la regulación de una línea.
- g) Por fin, y al mismo tiempo, incrementan el

factor de potencia de una instalación eléctrica.

En este estudio hablaremos exclusivamente de capacitores para incrementar el factor de potencia, lo cual acarrea, al mismo tiempo, una reducción de pérdidas en las alimentaciones y, por consiguiente, una reducción en la demanda de energía o bien, un aumento en el aprovechamiento de la energía suministrada .

## CAPITULO I

### EL FACTOR DE POTENCIA

Es de práctica común actualmente en las compañías que suministran energía eléctrica, de basar la cuenta por servicios aplicados, no solo en los kilowatt-horas consumidos, pero también en otros factores asociados al suministro de esta energía y que redundan en un mal aprovechamiento de la instalación.

Todos esos factores como : pérdidas de energía por exceso de reactancia, caídas de potencial excesivas y por lo tanto mala regulación, sobrecargas en los alimentadores, etc. se pueden resumir en un solo término : el factor de potencia es muy bajo.

¿ Qué es el factor de potencia entonces? Es la relación entre la potencia activa o de trabajo y la potencia total, o entre la corriente de trabajo y la corriente de la línea.

$$\text{Factor de Potencia} = \frac{\text{Kilowatts}}{\text{Kilovolt-Amperes}} = \frac{\text{KW}}{\text{KVA}}$$

En la mayoría de los circuitos de corriente alterna, la corriente total está formada por dos componentes en cuadratura : la componente activa, enérgica o de trabajo y la componente reactiva, desvada o magnetizante.

Mientras que la potencia consumida está determinada por la corriente de trabajo únicamente, la corriente total requerida determina el tamaño del generador, la capacidad de las líneas y circuitos alimentadores, el tamaño de los transformadores, los reguladores y demás equipo empleado para suministrar el servicio. Esta corriente total está formada por lo tanto, por dos componentes en cuadratura : la componente activa, en fase con el voltaje y la componente reactiva o magnetizante en motores, generadores, transformadores, formando un ángulo de 90 grados con la anterior.

La componente reactiva no produce trabajo, puesto que no tiene proyección sobre el eje de las tensiones, pero sí carga al equipo eléctrico y a las líneas en el mismo sentido que la corriente de trabajo.

La corriente de trabajo es, en consecuencia, igual a la proyección de la corriente total sobre el eje de los voltajes, lo cual viene siendo igual a multiplicar la corriente total por el Coseno del ángulo formado por la corriente y la tensión.

Al Coseno de este ángulo es al que se le llama FACTOR DE POTENCIA del circuito y la potencia será igual al producto de la corriente por el voltaje y por el factor de potencia (F.P.). Esta relación está muestra-

da gráficamente por la Figura 1 que nos servirá de ejemplo y dónde se indica el diagrama vectorial de un circuito con 50 Amps. de corriente útil aplicada a una carga con factor de potencia de 75 % atrasado.

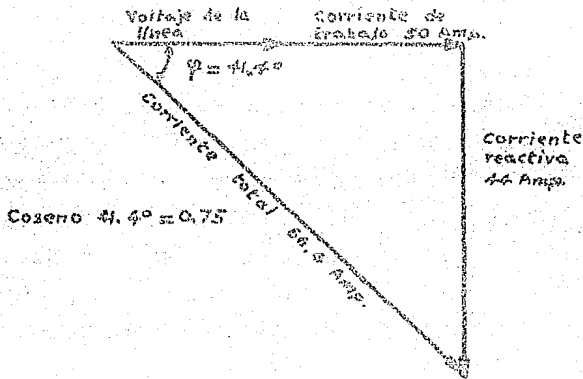


Fig. 1

La componente reactiva puede, en un instante dado, estar atras o adelante de la componente activa en su secuencia de fase con respecto a la tensión. Es decir que el factor de potencia puede ser atrasado o adelantado y es esta propiedad de las corrientes reactivas la que nos da la solución para cambiar el factor de potencia de un circuito al modificar el valor y sentido de las reactancias intercaladas en él .

CAUSAS PRINCIPALES DE UN BAJO FACTOR DE POTENCIA

I) Motores de inducción.- Este es el tipo de motor mas ampliamente utilizado en la industria por su robustez, sencillez de construcción, sencillez de instalación, de operación y de reposición, por su alto par de arranque, sobre todo en los de rotor devanado, dando el arranque es rápido y se presta a control reversible casi instantáneo.

Además durante alguna falla en la línea de alimentación, la contribución de un motor de inducción es casi nula excepto durante una breve transición, al revés de la de un motor síncrono. Por fin, este tipo de motor no se ve tan afectado en el ritmo de su marcha por variaciones periódicas de voltaje, al contrario de un motor síncrono .

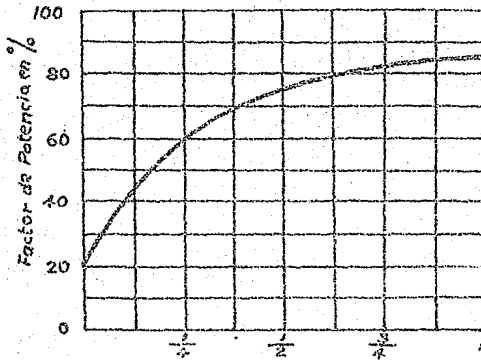


Fig. 2



Ahora bien, el motor de inducción rara vez, y sólo con equipos de compensación, alcanza un factor de potencia de 93 % atrasado y generalmente opera con 80 % o menos en máquinas medianas y chicas, bajando todavía más con cargas menores de la nominal, como se puede observar en la característica mostrada en la Fig.2; mientras que el motor síncrono es capaz de operar a Factor unitario e inclusive con corrientes adelantadas.

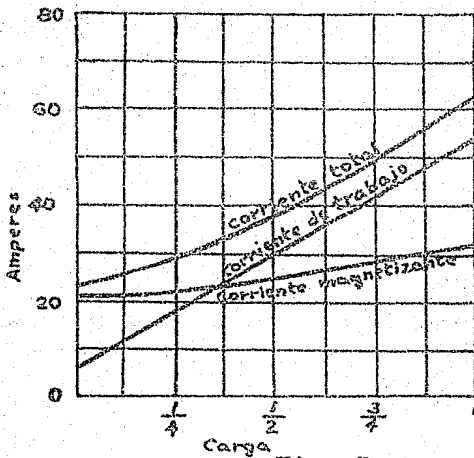


Fig. 3

Como la corriente magnetizante o de excitación de un motor es casi la misma a cualquier carga, se desprende que, al disminuir esta última, la proporción de corriente devorada a corriente de trabajo aumenta mucho, luego el ángulo de defasaje entre KW y KVA aumenta y, por

lo tanto disminuye el factor de potencia - las curvas características de un motor de inducción mostradas en la Fig.3 son un ejemplo de lo mencionado. Por otro lado, los motores de baja velocidad requieren mayor excitación que los de alta velocidad de la misma capacidad y por consiguiente, los primeros tendrán un factor de potencia mucho menor.

También, al aumentar el voltaje arriba del valor nominal de placa, se aumenta la corriente magnetizante y por lo tanto disminuye el factor de potencia.

En consecuencia y para conservar un buen factor de potencia en los motores de inducción se necesita:

- a) Trabajar con alto porcentaje de plena carga o sea, que los motores no estén sobrados con respecto a la máquina impulsada;
- b) Mantener el voltaje aplicado en valores cercanos al de placa;
- c) Utilizar de preferencia motores de alta velocidad (acoplados con engranes reductores de velocidad por ejemplo).

II. Transformadores. - Al igual que los motores de inducción, los transformadores necesitan de corriente de excitación para magnetizar su núcleo. Por lo tanto, también consumen KVA reactivos que provocan un bajo factor de potencia.

Para una planta generadora no conviene, en consecuencia, que haya transformadores conectados sin carga, ni que estos estén sobrados con respecto a la carga -

normalmente utilizada puesto que también se traduce en una disminución del factor de potencia.

La regulación de un transformador disminuye al aumentar el factor de potencia, es decir que la tensión secundaria con carga se acerca a la tensión en vacío al disminuir el valor de las reactivancias como lo demuestra la ecuación :

$$\begin{aligned} \% \text{Reg.} &= 100 \frac{(V_0 - V)}{V} \\ &= p \cos \varphi + q \text{ Sen } \varphi + \frac{(q \cos \varphi - p \text{ Sen } \varphi)^2}{200} \end{aligned}$$

dónde  $p = 100 \frac{R_s I_s}{V}$  y  $q = 100 \frac{X_s I_s}{V}$

Además podemos ver en las curvas de la Fig.4. cómo la tensión con carga  $V$  es mayor que la tensión en vacío  $V_0$  con factor de potencia adelantado y por lo contrario, es menor con factor de potencia atrasado o sea, que al poner carga, la tensión secundaria disminuye con cargas reactivas principalmente y aumenta con cargas capacitivas.

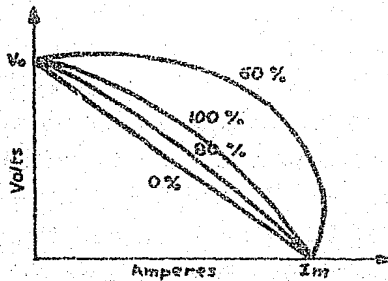


Fig.4

III.- Cualquier aparato de tipo inductivo contribuye también, en mayor o menor grado en atrasar el factor de potencia global de una instalación industrial. En este caso se encuentran los electroimanes, los reactores para limitar la corriente transitoria de corte circuito, los reactores de lámparas fluorescentes o de arcos luminosos de neón, los hornos de inducción y, principalmente, los hornos de arco y soldadoras eléctricas que trabajan acoplados a transformadores y la mayoría del tiempo con baja carga media, es decir con muy bajo factor de potencia diario medio.

Los hornos de inducción, como su nombre lo indica utilizan el principio de inducir corrientes por medio de una inductancia en un núcleo formado principalmente por los materiales ferromagnéticos que se desean fundir. Es natural por lo tanto, que estas corrientes sean altamente reactivas y den lugar a un bajo factor de potencia. En el caso de hornos de arco, también se produce un efecto semejante puesto que al existir materiales ferromagnéticos adheridos al horno se forman corrientes inductivas circulantes y además, al igual que en las soldadoras de arco de corriente alterna, estos aparatos acoplados a transformadores no trabajan constantemente a carga plena, lo cual contribuye grandemente a reducir el factor de potencia.

Como vemos, la mayoría de los aparatos eléctricos de uso general en la industria, producen un bajo factor de potencia en las líneas de alimentación y este repercute, como ya lo hemos indicado, en una mala utili-

zación de la energía eléctrica y del equipo de generación y transmisión, que no se aprovecha plenamente para la producción y transporte de energía.

### COMO MEJORAR EL FACTOR DE POTENCIA

Como ya dijimos en el capítulo anterior, la relación que existe entre la corriente total, la corriente activa y la corriente reactiva se expresa por medio de la ecuación :

$$\text{corriente total} = \sqrt{(\text{corriente activa})^2 + (\text{corriente reactiva})^2}$$

ecuación que se ilustró por medio de la Fig.1.

El factor de potencia entonces sera la relación de corrientes activa a corriente total :

$$\text{f.p.} = \frac{\text{corriente activa}}{\text{corriente total}}$$

que se define más comunmente como la relación de potencia activa o de trabajo en KW a la potencia total en KVA :

$$\text{f.p.} = \frac{\text{KW}}{\text{KVA}} \quad \text{o bien} \quad \text{KW} = \text{f.p.} \times \text{KVA}$$

El factor de potencia, por lo tanto representa el valor del coseno del ángulo formado por la corriente activa y la corriente total o por los kilowatts y los kilovolt-amperes, ángulo designado generalmente por  $\varphi$  como se ilustra en la Fig.1.

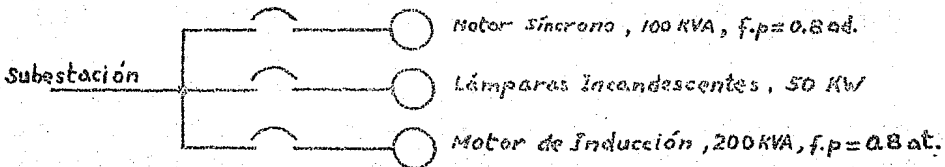
El factor de potencia puede ser atrasado o adelantado según que, el vector representativo de la corriente vaya atras o adelante del vector tensión en su secuencia de fases.

Toda inductancia como : transformadores, reactores, solenoides, autotransformadores, etc. producen un F.P. atrasado como si las variaciones de corriente sufrieran un retardo con respecto a las de tensión.

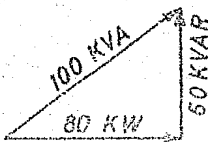
En las maquinas rotatorias se presentan varios casos según que la carga sea un motor de inducción o un motor síncrono. Si la carga es un motor de inducción o un motor síncrono excitado abajo del sincronismo consume KW para impulsarlo y KVAR para magnetizar su campo y, en consecuencia, tiene un F.P. atrasado así como el generador que lo alimenta.

Por lo contrario, si la carga es un motor síncrono sobrecargado, entonces consume KW pero entrega KVAR a la línea, produciendo un F.P. adelantado, tanto en la carga como en el generador. En este caso decimos que trabaja como condensador síncrono.

El factor de potencia de una carga se puede leer directamente en un factorímetro o bien se puede encontrar por medio de lecturas de wattmetros y varmetros. Sin embargo el F.P. de un grupo de cargas alimentadas por una línea deberá ser calculado por medio de sumas vectoriales es decir sumando entre sí los KW por un lado y los KVAR por otro lado para obtener el triángulo de corrientes de la carga conjunta según el ejemplo siguiente :



Motor síncrono

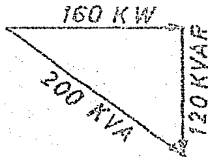


$$KW = \text{fp} \times KVA = 0.8 \times 100 = 80 \text{ KW}$$

$$KVAR = \sqrt{(KVA)^2 - (KW)^2} = \sqrt{(100)^2 - (80)^2} = 60$$

$$= KVA \text{ sen } \varphi = 100 \times 0.6 = 60 \text{ KVAR}$$

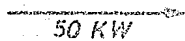
Motor de inducción



$$KW = 200 \times 0.8 = 160 \text{ KW}$$

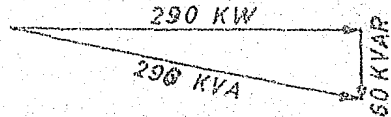
$$KVAR = 200 \times 0.6 = 120 \text{ KVA}$$

Lámparas incandescentes



$$50 \text{ KVA} = 50 \text{ KW}$$

$$\text{KVAR} = 0$$



$$\Sigma KW = 80 + 160 + 50 = 290 \text{ KW}$$

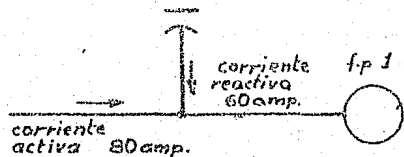
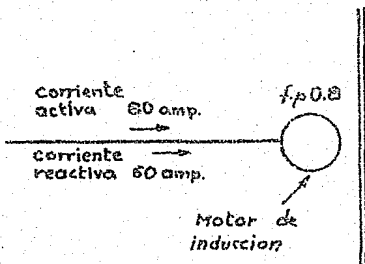
$$\Sigma KVAR = 60 - 120 + 0 = -60 \text{ KVAR}$$

$$KVA = \sqrt{60^2 + 290^2} = 296 \text{ KVA}$$

$$\text{FP global} = \frac{290}{296} = 0.98 \text{ atrás}$$

Como vemos, gracias al motor síncrono, el F.P. global ha aumentado casi hasta la unidad.

Por medio de un capacitor también podemos mejorar el F.P. global de una instalación. Pongamos por ejemplo:



$$\begin{aligned} 1^\circ \\ \text{Corriente total en la línea} = \\ = \sqrt{80^2 + 60^2} = 100 \text{ amp.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2^\circ \\ \text{Corriente total} = \\ = \sqrt{80^2 + 0} = 80 \text{ amp.} \end{aligned}$$

Al introducir el capacitor, mejoró el F.P. hasta hacerse unitario y se redujo la corriente total suministrada por la línea. Los 20 amp. restantes podrán ser empleados en cualquier otra carga adicional, aprovechando así al máximo la energía enviada.

Generalmente, tanto en el caso de capacitores estáticos como síncronos, no se incrementa el F.P. hasta la unidad, o sea no se instalan capacitores capaces de entregar el total de KVAR que requieren las cargas inductivas, en primer lugar porque sería excesivamente costoso y en segundo lugar porque las compañías no exigen generalmente más que un factor de 0.8 como mínimo antes de aplicar tarifas adicionales.

### MÉTODOS PRÁCTICOS DE CÁLCULO PARA MEJORAR EL FACTOR DE POTENCIA

Hemos visto en la exposición anterior que el cálculo del F.P. se basa en las propiedades trigonométricas del triángulo rectángulo. De estas propiedades sacaremos las conclusiones y ecuaciones expuestas a continuación : Del triángulo rectángulo obtenemos :

$$\text{Cos } \varphi = \text{FP} = \frac{\text{KW}}{\text{KVA}} \quad (1)$$

$$\text{Sen } \varphi = \frac{\text{KVAR}}{\text{KVA}}$$

$$\text{tg. } \varphi = \frac{\text{KVAR}}{\text{KW}}$$



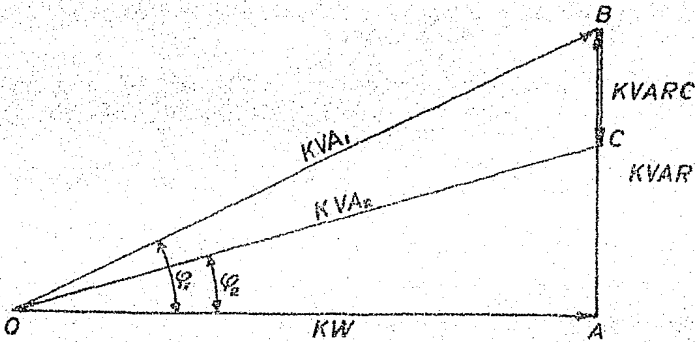


Fig. 5

La componente de trabajo generalmente se man- tiene constante y sin embargo los KVA y KVAR son los que - varían con el factor de potencia. Por esta razón la ecua- ción que nos es de mayor utilidad es la tercera que escri- biremos :

$$KVAR = KW \times \operatorname{tg} \psi \quad (2)$$

Ahora, basándonos en la Fig.5 en la cual los símbolos sig- nifican :

- OA = KW = potencia activa o de trabajo
- OB = KVA<sub>1</sub> = potencia total inicial sin capacitor
- OC = KVA<sub>2</sub> = potencia total final con capacitor
- AB = KVAR<sub>1</sub> = componente reactiva de la carga

A C = KVAR<sub>2</sub> = componente reactiva con el capacitor conectado.

B C = KVARC = componente reactiva del capacitor necesario para mejorar el FP. de Cos φ<sub>1</sub> a Cos φ<sub>2</sub>

vamos a calcular KVARC o sea la capacidad necesaria del capacitor :

$$AB = OA \operatorname{tg} \varphi_1 = KW \operatorname{tg} \varphi_1 = KVAR_1$$

$$AC = OA \operatorname{tg} \varphi_2 = KW \operatorname{tg} \varphi_2 = KVAR_2$$

$$AB - AC = BC = KVARC$$

$$KVARC = KVAR_1 - KVAR_2 = KW \operatorname{tg} \varphi_1 - KW \operatorname{tg} \varphi_2$$

$$KVARC = KW ( \operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2 ) \quad (3)$$

La ecuación anterior da la capacidad del condensador en función de la potencia activa, del ángulo de fase inicial y del ángulo de fase deseado o final.

Por medio de tablas de funciones trigonométricas podríamos encontrar la capacidad del condensador, pero se han establecido gráficas y tablas que dan directamente la diferencia de tangentes correspondientes a los factores de potencia inicial y deseado .

En cualquier tabla de funciones trigonométricas podemos encontrar la tangente correspondiente a un factor de potencia cualquiera (Cos φ). Basta con hacer la diferencia de tangentes y multiplicar por los KW (aplicando la ecuación 3) para obtener los KVARC.

La gráfica I y la tabla I nos dan directamente el factor que se aplica a los KW en función del factor de potencia original y deseado.

### VALORACION ECONOMICA DEL FACTOR DE POTENCIA

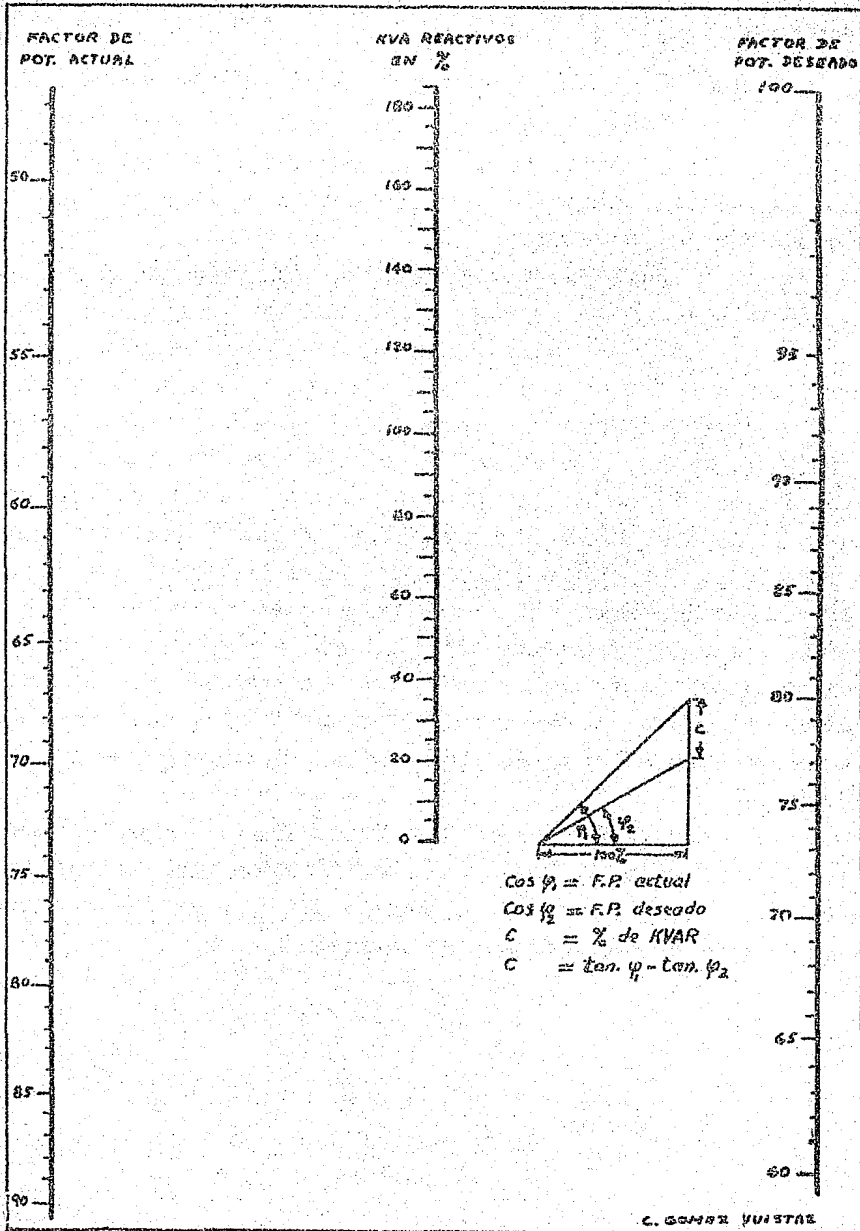
La razón principal del empleo de capacitores en la industria es la de reducir el costo de la energía utilizada cuando la tarifa de consumo contiene alguna cláusula - por factor de potencia.

Generalmente la ganancia obtenida al invertir - en capacitores paga varias veces esta inversión inicial.

A principios de siglo se crearon varias compa--ñías productoras de energía eléctrica, cercanas en general a los lugares de consumo pero donde los motores de induc--ción eran de baja velocidad y por consiguiente tenían un - bajo factor de potencia. Pronto resultaron sobrecargadas la mayoría de las plantas generadoras y líneas de distribución. A medida que aumentaron las distancias de distribución y - las cargas impuestas se hizo más necesario, para dichas com--pañías, suministrar casi exclusivamente potencia útil y no cargar al sistema con kilovars magnetizantes. También se - hacía necesario incrementar el factor de potencia para man--tener niveles de tensión y pérdidas del sistema en forma - adecuada.

Para compensar las inversiones hechas al aumen--tar los sistemas de generación y distribución, las compa--ñías se vieron sujetas a imponer cláusulas por bajo factor de potencia en sus tarifas de consumo.

GRAFICA I



# TABLA I

## COEFICIENTE PARA DETERMINAR KWARC A PARTIR DE KW

FA Original	FACTOR DE EFICIENCIA DESEADO COS. %																				
	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	1.0	
0.50	0.922	1.003	1.034	1.050	1.056	1.112	1.130	1.165	1.192	1.220	1.248	1.276	1.293	1.327	1.369	1.403	1.440	1.481	1.529	1.559	1.732
0.51	0.937	0.922	0.989	1.016	1.041	1.067	1.054	1.120	1.147	1.175	1.203	1.231	1.261	1.292	1.324	1.358	1.395	1.436	1.484	1.6	1.637
0.52	0.953	0.919	0.945	0.971	0.997	1.023	1.050	1.076	1.103	1.131	1.159	1.187	1.217	1.248	1.280	1.314	1.351	1.392	1.440	1.500	1.643
0.53	0.950	0.876	0.902	0.928	0.954	0.980	1.007	1.033	1.059	1.089	1.116	1.144	1.174	1.203	1.237	1.271	1.308	1.349	1.397	1.457	1.600
0.54	0.909	0.825	0.861	0.887	0.913	0.939	0.966	0.992	1.019	1.047	1.075	1.103	1.133	1.164	1.196	1.230	1.267	1.309	1.356	1.416	1.559
0.55	0.769	0.795	0.821	0.847	0.873	0.899	0.926	0.952	0.979	1.007	1.035	1.063	1.093	1.124	1.156	1.190	1.227	1.268	1.316	1.376	1.519
0.56	0.730	0.756	0.782	0.808	0.834	0.860	0.887	0.913	0.940	0.968	0.996	1.024	1.054	1.085	1.117	1.151	1.188	1.229	1.277	1.337	1.480
0.57	0.692	0.718	0.744	0.770	0.796	0.822	0.849	0.875	0.902	0.930	0.958	0.988	1.016	1.047	1.079	1.113	1.150	1.191	1.235	1.290	1.442
0.58	0.656	0.681	0.707	0.733	0.759	0.785	0.812	0.838	0.865	0.893	0.921	0.949	0.979	1.010	1.042	1.076	1.113	1.154	1.202	1.262	1.405
0.59	0.619	0.645	0.671	0.697	0.723	0.749	0.776	0.802	0.829	0.857	0.885	0.913	0.943	0.974	1.006	1.040	1.077	1.118	1.166	1.226	1.369
0.60	0.583	0.609	0.635	0.661	0.687	0.713	0.740	0.766	0.793	0.821	0.849	0.877	0.907	0.939	0.970	1.004	1.041	1.082	1.130	1.190	1.333
0.61	0.546	0.576	0.601	0.627	0.653	0.678	0.703	0.729	0.756	0.787	0.815	0.843	0.873	0.904	0.936	0.970	1.007	1.048	1.093	1.150	1.290
0.62	0.516	0.542	0.568	0.594	0.620	0.646	0.673	0.699	0.726	0.754	0.782	0.810	0.840	0.871	0.903	0.937	0.974	1.016	1.063	1.123	1.264
0.63	0.483	0.509	0.535	0.561	0.587	0.613	0.640	0.666	0.693	0.721	0.749	0.777	0.807	0.838	0.870	0.904	0.941	0.982	1.030	1.090	1.233
0.64	0.451	0.474	0.503	0.529	0.555	0.581	0.608	0.634	0.661	0.689	0.717	0.745	0.775	0.806	0.838	0.872	0.909	0.950	0.998	1.058	1.201
0.65	0.419	0.445	0.471	0.497	0.523	0.549	0.576	0.603	0.630	0.657	0.685	0.713	0.745	0.774	0.806	0.840	0.877	0.918	0.968	1.026	1.169
0.66	0.388	0.414	0.440	0.466	0.492	0.518	0.545	0.571	0.598	0.626	0.654	0.682	0.712	0.743	0.775	0.809	0.846	0.887	0.936	0.995	1.138
0.67	0.358	0.384	0.410	0.436	0.462	0.488	0.515	0.541	0.568	0.596	0.624	0.652	0.682	0.713	0.745	0.779	0.816	0.857	0.905	0.965	1.108
0.68	0.328	0.354	0.380	0.406	0.432	0.458	0.485	0.511	0.538	0.566	0.594	0.622	0.652	0.683	0.715	0.749	0.786	0.827	0.875	0.935	1.078
0.69	0.299	0.325	0.351	0.377	0.403	0.429	0.456	0.482	0.509	0.537	0.565	0.593	0.623	0.654	0.686	0.720	0.757	0.798	0.846	0.906	1.049
0.70	0.270	0.296	0.322	0.348	0.374	0.400	0.427	0.453	0.480	0.508	0.536	0.564	0.594	0.625	0.657	0.691	0.728	0.769	0.817	0.877	1.020
0.71	0.242	0.268	0.294	0.320	0.346	0.372	0.399	0.425	0.452	0.480	0.508	0.536	0.566	0.597	0.629	0.663	0.700	0.741	0.789	0.849	0.992
0.72	0.214	0.240	0.266	0.292	0.318	0.344	0.371	0.397	0.424	0.452	0.480	0.508	0.538	0.569	0.601	0.635	0.672	0.713	0.761	0.821	0.964
0.73	0.186	0.212	0.238	0.264	0.290	0.316	0.343	0.369	0.396	0.424	0.452	0.480	0.510	0.541	0.573	0.607	0.644	0.685	0.733	0.793	0.936
0.74	0.159	0.185	0.211	0.237	0.263	0.289	0.316	0.342	0.369	0.397	0.425	0.453	0.483	0.514	0.546	0.580	0.617	0.658	0.706	0.766	0.909
0.75	0.132	0.158	0.184	0.210	0.236	0.262	0.289	0.315	0.342	0.370	0.398	0.426	0.456	0.487	0.519	0.553	0.590	0.631	0.679	0.739	0.882

0.76	0.105	0.131	0.157	0.183	0.209	0.235	0.262	0.288	0.315	0.343	0.371	0.399	0.429	0.460	0.492	0.525	0.565	0.604	0.632	0.712	0.855
0.77	0.079	0.105	0.131	0.157	0.183	0.209	0.236	0.262	0.289	0.317	0.345	0.373	0.403	0.434	0.466	0.500	0.537	0.578	0.626	0.686	0.829
0.78	0.052	0.078	0.104	0.130	0.156	0.182	0.209	0.235	0.262	0.290	0.318	0.346	0.376	0.407	0.439	0.473	0.510	0.551	0.600	0.659	0.802
0.79	0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.156	0.183	0.209	0.236	0.264	0.292	0.320	0.350	0.381	0.413	0.447	0.484	0.525	0.573	0.633	0.776
0.80	0.000	0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.157	0.183	0.210	0.238	0.266	0.294	0.324	0.355	0.387	0.421	0.458	0.499	0.547	0.609	0.750
0.81		0.000	0.026	0.052	0.078	0.104	0.131	0.157	0.184	0.212	0.240	0.268	0.298	0.329	0.361	0.395	0.432	0.473	0.521	0.581	0.724
0.82			0.000	0.026	0.052	0.078	0.105	0.131	0.158	0.186	0.214	0.242	0.272	0.303	0.335	0.369	0.406	0.447	0.495	0.555	0.698
0.83				0.000	0.026	0.052	0.079	0.105	0.132	0.160	0.188	0.216	0.246	0.277	0.309	0.343	0.380	0.421	0.469	0.529	0.672
0.84					0.000	0.026	0.053	0.079	0.106	0.134	0.162	0.190	0.220	0.251	0.283	0.317	0.354	0.395	0.443	0.503	0.646
0.85						0.000	0.027	0.053	0.080	0.108	0.136	0.164	0.194	0.225	0.257	0.291	0.328	0.369	0.417	0.477	0.620
0.86							0.000	0.028	0.053	0.081	0.109	0.137	0.167	0.198	0.230	0.264	0.301	0.342	0.390	0.450	0.593
0.87								0.000	0.027	0.055	0.083	0.111	0.141	0.172	0.204	0.238	0.275	0.316	0.364	0.424	0.567
0.88									0.000	0.028	0.056	0.084	0.114	0.145	0.177	0.211	0.248	0.289	0.337	0.397	0.540
0.89										0.000	0.028	0.056	0.086	0.117	0.149	0.183	0.220	0.261	0.309	0.369	0.512
0.90											0.000	0.028	0.058	0.089	0.121	0.155	0.192	0.233	0.281	0.341	0.484
0.91												0.000	0.030	0.061	0.093	0.127	0.164	0.205	0.253	0.313	0.456
0.92													0.000	0.031	0.063	0.097	0.134	0.175	0.223	0.283	0.426
0.93														0.000	0.032	0.066	0.103	0.144	0.192	0.252	0.395
0.94															0.000	0.034	0.071	0.112	0.160	0.220	0.363
0.95																0.000	0.037	0.070	0.120	0.186	0.329
0.96																	0.000	0.041	0.089	0.149	0.292
0.97																		0.000	0.048	0.108	0.251
0.98																			0.000	0.060	0.203
0.99																				0.000	0.143
																					0.000

Las cláusulas por bajo factor de potencia no se han estandarizado y existen en todos los países, bajo formas distintas, cuyas líneas generales se enumeran a continuación :

- a) Pago por kilowatt solicitados basado en un contrato o factura y dónde la cuenta depende del valor correspondiente a la relación de un factor de potencia base entre el factor de potencia actual y que se puede expresar como :

Factura por demanda contratada de KW =

$$\text{Factura por demanda actual de KW } \frac{\text{F.P. base}}{\text{F.P. actual}}$$

- b) Igual que (a) pero con un cargo adicional por energía consumida (kilowatthoras) correspondiente a la demanda solicitada (en este caso se pueden reducir tanto los cargos por demanda como por energía consumida).
- c) Pago por demanda, basado en los KVA actuales con cargos por energía dependientes o independientes de la carga contratada.
- d) Porcentaje simple de aumento o disminución a la cuenta de pago dependiente de qué tan chico o grande sea el factor de potencia medio con respecto al FP. base.
- e) Cargos independientes por demanda de kilowatts y kilovars o por kilowatthoras y kilovarhoras .

Casi todos estos sistemas se podrían resumir bajo dos formas : pagar una tarifa de sanción por trabajar -

abajo de un FP. base como sucede en México o bien percibir una bonificación por trabajar arriba del FP. base como sucede generalmente en Estados Unidos.

El factor de potencia base es generalmente de un 80% u 85 %.

Por medio de medidores de energía activa y reactiva deducen las Empresas de Luz y Fuerza el factor de potencia medio empleado, según el cual harán las sanciones o bonificaciones adecuadas.

Para bonificaciones se emplean generalmente en los Estados Unidos los valores indicados en la tabla II.

TABLA II

Relación de lecturas de medidores . <u>Energía reactiva</u> <u>Energía activa</u>	Factor de potencia	Bonificación sobre el monto de la facturación mensual
0.883 o más.....	74.9 o menos	0 %
0.882 a 0.752 .....	75.0 a 79.9	1 %
0.751 a 0.622 .....	80.0 a 84.9	2 %
0.621 a 0.486 .....	85.0 a 89.9	3 %
0.485 a 0.331 .....	90.0 a 94.9	4 %
0.330 a 0.000 .....	95.0 a 100.0	5 %

Con este sistema todo cliente que mejore su factor de potencia recibe materialmente beneficios por la inversión en capacitores y además al quedar amortizados, el beneficio queda como ingreso adicional .



TABLA III

Factor de Potencia	Factor para multiplicar la cuenta mensual
51	1.569
52	1.538
53	1.509
54	1.481
55	1.455
56	1.428
57	1.404
58	1.379
59	1.356
60	1.333
61	1.311
62	1.290
63	1.270
64	1.250
65	1.231
66	1.212
67	1.194
68	1.176
69	1.159
70	1.143
71	1.127
72	1.111
73	1.096
74	1.081
75	1.067
76	1.053
77	1.039
78	1.026
79	1.013
80	1.000

El sistema utilizado generalmente en México sigue la forma de la cláusula siguiente y que se basa en el punto (a) mencionado anteriormente :

" El consumidor procurará mantener un factor de potencia tan aproximado a 100% (cien por ciento) como sea práctico; pero en caso de que su factor

de potencia durante cualquier mes, tenga un promedio menor de 80% (ochenta por ciento) atrasado determinado por métodos aprobados por la Secretaría de Economía, las Empresas tendrán derecho a cobrar al consumidor la cantidad que resulte de multiplicar el monto del recibo correspondiente por 80% (ochenta por ciento) y dividir el producto entre el factor de potencia medio atrasado, - en por ciento, observado durante el mes ".

Según esta cláusula la compañía de Luz y Fuerza Motriz le cobra al cliente con factor de potencia menor de 80% su cuenta multiplicada por un factor mayor que la unidad indicado en la tabla III .

#### ¿QUE TANTO PUEDE MEJORARSE EL FACTOR DE POTENCIA DE UNA FABRICA?

La necesidad de mejorar el factor de potencia depende del F.P. original y de la estructura de las tarifas impuestas, por lo tanto cada caso deberá ser estudiado individualmente.

Pero de todos modos es económico mejorar el F.P. a altos valores como 90% o 95% para obtener plena ventaja de las bonificaciones o evitar los cargos de castigo además de poder utilizar mayor carga con una misma instalación. La mejor forma de determinar la capacidad necesaria de los condensadores para una instalación dada es calculando la recuperación de la inversión y el ahorro en pesos para varios factores de potencia finales, pero tomando en cuenta que existe un límite en el ahorro por cada kilovar adicional que puede

hacer aparecer poco atractivo, económicamente hablando, el mejorar excesivamente el factor de potencia.

Prácticamente cualquier tipo de fábrica con cláusulas normales para bajo F.P. justifica la instalación de capacitores. El factor primordial para hacer esta inversión es, como hemos dicho, el grado de utilidad.

Actualmente el grado de utilidad es mayor para pequeñas fábricas o instalaciones, por ser mayores las tarifas para demanda y consumo de energía a bajas cargas.

Generalmente cualquier industria que tenga procesos de manufactura con motores de inducción parcialmente cargados, hornos eléctricos, soldadoras, tendrá una operación a bajo factor de potencia (es decir menor de 80%). Casos típicos de baja carga son : bombas pequeñas, ventiladores, compresoras, así como máquinas herramientas como tornos, cepillos, fresas, troqueladoras, etc.

Haremos un cálculo de aplicación de capacitores para mejorar el F.P. con respecto a tarifas vigentes en México y el costo aproximado de una instalación con capacitores.

Tomemos como ejemplo un cliente industrial cuya gráfica de demanda y de consumo de potencia reactiva así como F.P. diarios presenta la forma mostrada en la Fig.6 :

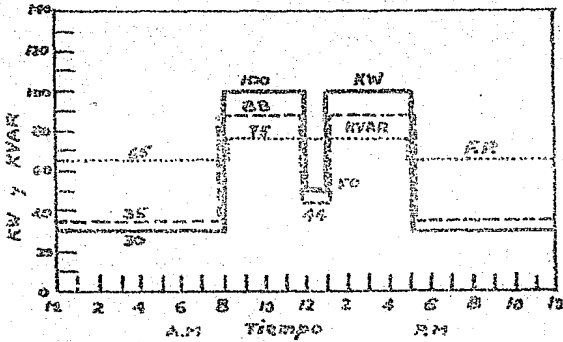


Fig.6

Naturalmente, basta con cualquiera de estas dos cantidades para obtener la tercera, pero se confrontan las tres para mayor conveniencia.

Los picos de demanda máxima, que no se muestran alcanzan 125 KW a intervalos poco frecuentes y con un factor de potencia de 0,80 . Tampoco estan indicadas las cargas de fin de semana (medio día del sábado y el domingo completo), pero las supondremos iguales a las de horas no laborales mostradas en la gráfica (Fig.6).

Consideraremos también que el factor de potencia será medido como factor de potencia promedio mensual.

Demanda máxima medida = 125 KW

Energía consumida mensualmente = 35,520 KWH

Potencia reactiva consumida mensualmente = 35,592 KVAR-H

TARIFA ESTABLECIDA: Tarifa N°6 de la Compañía de Luz y Fuerza Motriz, S.A., de Octubre de 1954 :

Cuotas mensuales:

-Cargos fijos por demanda contratada independientes de la energía consumida.

§ 290.00 (doscientos noventa pesos) por los primeros 20 (veinte) kilowatts o menos de demanda máxima medida.

§ 5.80 (cinco pesos ochenta centavos) por cada uno de los siguientes 30 (treinta) kilowatts o fracción de demanda máxima medida.

§ 2.90 (dos pesos noventa centavos) por cada kilowatt o fracción de demanda máxima medida en exceso de los anteriores.

-Cargos adicionales por la energía consumida.

§ 0.146 (catorce centavos seis décimos de centavo) por cada uno de los primeros 15,000 (quince mil) kilowatt-horas.

§ 0.116 (once centavos seis décimos de centavo) por cada uno de los siguientes 350 (trescientos cincuenta) kilowatt-horas por cada kilowatt de demanda máxima medida.

§ 0.087 (ocho centavos siete décimos de centavo) por cada kilowatt-hora en exceso de los anteriores .

La cláusula de aumento por bajo factor de potencia se establece bajo la forma :

Factura por demanda contratada en KW = Factura por demanda en KW máximos medidos

0.80  
P.P.actual

RESOLUCION

Cargos mensuales por demanda contratada sin capacitores :

a) Factor de potencia medio mensual :

Este será establecido por medio de la medición de -  
kilowatt-horas y kilovars-horas.

Tomando el mes normal como de 30 días con 24 días  
laborables (contando medio día del sábado) y 6 días  
no laborables, y con respecto a la gráfica estable-  
cida (Fig.6):

Kw-hr por día laborable :

$$\begin{aligned} 15 \text{ horas a } 30 \text{ Kw} &= 450 \text{ Kw-hr.} \\ 8 \text{ " a } 100 \text{ Kw} &= 800 \text{ Kw-hr.} \\ 1 \text{ hora a } 50 \text{ Kw} &= \underline{50 \text{ Kw-hr.}} \\ &1300 \text{ Kw-hr.} \end{aligned}$$

Kw-hr por día no laborable :

$$24 \text{ horas a } 30 \text{ Kw} = 720 \text{ Kw-hr.}$$

$$\begin{aligned} \text{Kw-hr mensuales} &= 24 (1300) + 6 (720) \\ &= 31200 + 4320 \\ &= \underline{\underline{35520 \text{ Kw-hr.}}} \end{aligned}$$

KVAR-hr por día laborable :

$$\begin{aligned} 15 \text{ horas a } 35 \text{ KVAR} &= 525 \text{ KVAR-hr.} \\ 8 \text{ " a } 88 \text{ KVAR} &= 704 \text{ " } \\ 1 \text{ hora a } 44 \text{ KVAR} &= \underline{44 \text{ "}} \\ &1273 \text{ KVAR-hr.} \end{aligned}$$

KVAR-hr por día no laborable :

$$24 \text{ horas a } 35 \text{ KVAR} = 840 \text{ KVAR-hr.}$$

$$\begin{aligned} \text{KVAR-hr mensuales} &= 24 (1273) + 6 (840) \\ &= 30552 + 5040 \\ &= \underline{\underline{35592 \text{ KVAR-hr.}}} \end{aligned}$$

$$\text{tangente (para el P.P. medio mensual)} = \frac{\text{KVAR-hr}}{\text{KW-hr}}$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{35592}{35520} = 1.002 \quad \text{Cos } \varphi = 0.706$$

Factor de Potencia medio mensual = 0.706

b) Cargo mensual por demanda contratada con carga máxima de 125 KW :

Por los primeros 20 KW	\$ 290,00
\$ 5,80 por cada uno de los siguientes	
30 KW	\$ 174,00
\$ 2,90 por cada uno de los siguientes	
75 KW	<u>\$ 217,50</u>
	\$ 681,50

c) Cargos mensuales por energía consumida:

\$ 0.146 por cada uno de los primeros  
15000 KW-hr. \$ 1190.00

Para el segundo bloque tendríamos :

$$350 \times 125 \text{ KW} = 43750 \text{ KW-hr}$$

que sobrepasan la carga consumida,

por lo tanto solo contaremos

$$35520 - 15000 = 20520 \text{ KW-hr a}$$

\$ 0.116 por cada uno de los 20520 KW-hr \$ 2380,30

total carga consumida \$ 3570.30

$$\begin{aligned} \text{KVAR-hr mensuales} &= 24 (1273) + 6 (840) \\ &= 30552 + 5040 \\ &= \underline{35592 \text{ KVAR-hr.}} \end{aligned}$$

$$\text{tangente (para el F.P. medio mensual)} = \frac{\text{KVAR-hr}}{\text{KW-hr}}$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{35592}{35520} = 1.002 \quad \text{Cos } \varphi = 0.706$$

Factor de Potencia medio mensual = 0.706

b) Cargo mensual por demanda contratada con carga máxima de 125 KW :

Por los primeros 20 KW	\$ 290,00
\$ 5,80 por cada uno de los siguientes	
30 KW	\$ 174,00
\$ 2,90 por cada uno de los siguientes	
75 KW	<u>\$ 217,50</u>
	\$ 681,50

c) Cargos mensuales por energía consumida:

\$ 0.146 por cada uno de los primeros  
15000 KW-hr. \$ 1190.00

Para el segundo bloque tendríamos :

$$350 \times 125 \text{ KW} = 43750 \text{ KW-hr}$$

que sobrepasan la carga consumida,

por lo tanto solo contaremos

$$35520 - 15000 = 20520 \text{ KW-hr a}$$

\$ 0.116 por cada uno de los 20520 KW-hr \$ 2380.30

total carga consumida \$ 3570.30



d) Cuenta total :

681.50 + 3570.30 =	\$ 4251.80
Más 10% impuesto C.F.E.	\$ 425.20
	<u>\$ 4677.00</u>

Aplicando el cargo por bajo F.P.

$$4677.00 \times \frac{0.80}{0.706} = 4677.00 \times 1.133 = \$ \underline{5299.04}$$

Sin este cargo la Compañía dejaría de percibir :

$$5299.04 - 4677.00 = 622.04 \text{ mensuales}$$

e) Selección de los capacitores necesarios para mejorar el F.P.

En general es deseable mejorar el F.P. de 0.90 a 0.95 para prever una operación con bajas cargas y para no sobrecargar la instalación de alimentación, ni las líneas, etc..

En este caso supondremos que se trata de mejorar el F.P. a 0.90 aproximadamente. En estas condiciones, - tomando la ecuación (3) :

$$KVARC = KW (tg \varphi_1 - tg \varphi_2)$$

y entrando a la tabla I con los factores inicial de 0.706 y final de 0.90 obtenemos el coeficiente: 0.519

$$tg \varphi_1 = 1.003 \quad tg \varphi_2 = 0.484$$

$$KVARC = 125 (0.519) = 64.87 \text{ KVAR capacitivos}$$

La capacidad estándar más próxima a este valor es de 60 KVARC. Por lo tanto el F.P. final con esta capacidad instalada será :

$$60 \text{ KVARC} = 125 \text{ KW} (1.003 - \text{tg } \varphi_2)$$

$$\begin{aligned} \text{tg } \varphi_2 &= \frac{125 \times 1.003 - 60}{125} \\ &= \frac{65.37}{125} = 0.523 \end{aligned}$$

Entrando a cualquier tabla de funciones trigonométricas encontramos que  $\text{Cos } \varphi_2 = 0.886$

Factor de potencia mejorado = 0.886

La carga contratada podrá aumentarse a :

$$\text{KW actuales} \times \frac{\text{F.P. mejorado}}{\text{F.P. Inicial}} = 125 \times \frac{0.886}{0.708} = 157 \text{ KW}$$

incrementandose así la capacidad de la fábrica con uno o varios motores más, hasta de 32 KW totales o sean 43 HP.

Considerando el costo aproximado de capacitores instalados, incluyendo interruptores, como de \$ 140.00 por KVARC, toda la instalación le saldría al cliente en unos \$ 8,400.00, amortizables en 14 meses con el ahorro de \$ 622.00 mensuales que ya no tendrá que pagar a la Compañía de Luz .

Como hemos visto, el cliente tiene un ahorro efectivo al mejorar su F.P. después de haber amortizado sus capacitores y puede además incrementar su carga sin ampliar la instalación existente. Naturalmente que en este caso tendrá que cambiar su contrato por tener mayor carga en KW y mayor consumo de potencia eléctrica.

Por otra parte, si el cliente no tiene necesidad de ampliar su carga entonces la compañía podrá utilizar estos 32 KW sobrantes para venderlos a otro cliente como primeros KW, o sea en la mayor tarifa, obteniendo también un beneficio neto.

## CAPITULO II

### VENTAJAS DEL CAPACITOR EN CIRCUITOS ALIMENTADORES

Otro aspecto importante de la utilidad de los capacitores aparece en los circuitos de distribución donde llenan tres finalidades básicas :

- a) Aliviar la capacidad de distribución de un circuito.
- b) Mejorar la tensión en la carga.
- c) Evitar el exceso de pérdidas del sistema.

a) El aumento constante de motores fraccionarios y demás cargas pequeñas, en circuitos de zonas residenciales, como son las batideras, licuadoras, aspiradoras, lavadoras, refrigeradores, etc. y el incremento constante de cargas inductivas en circuitos industriales, como bombas, compresoras, máquinas textiles, transportadores, tornos, fresas y tantos otros, ha resultado en un aumento constante de KVA reactivos con respecto a los kilowatts. El resultado neto se ha traducido por una disminución del factor de potencia medio de los alimentadores abajo de 70%, y en algunos casos, hasta 50% .

Cuando el F.P. es de 70% las pérdidas en el cobre se duplican y el 37% de la generación de energía y de la capacidad de la subestación se consume en el transporte y suministro de los KVA reactivos.

Esta corriente reactiva produce una caída de tensión bastante considerable en los circuitos de distribución además de sobrecargarlos inutilmente.

Los capacitores ofrecen un método práctico y económico de aliviar las líneas de esta carga extra porque pueden ser instalados bajo forma de bancos de capacidad relativamente pequeña, muy cerca de la fuente de KVA reactivos y, por lo tanto, permiten a dicha alimentación y demás equipo el transporte de más potencia útil, aumentando en consecuencia el aprovechamiento de los mismos generadores.

La ventaja principal de los capacitores sobre los condensadores sincrónicos descansa en el hecho de que pueden obtenerse pequeñas capacidades de bajo mantenimiento y con pérdidas muy reducidas. Los condensadores se pueden distribuir sobre una red de acuerdo con las necesidades de la carga concentrada, en puntos determinados.

En algunos casos la capacidad del alimentador está limitada por la corriente y en otros casos por la caída de tensión. Cuando la corriente es el factor limitador, el costo del capacitor -

por KW ganado en capacidad del alimentador, depende del factor de potencia de la carga y del porcentaje de ganancia. Cuando la tensión es el factor limitador, el costo del capacitor por KW ganado en capacidad del alimentador depende de la relación de resistencia a reactancia del circuito y del factor de potencia de la carga.

En muchos casos un circuito está sobrecargado térmicamente a causa de un bajo factor de potencia .

Tomemos el ejemplo de un cable sobrecargado por estar trabajando la carga a bajo factor de potencia. Las características del cable son :

Cable en forro de plastilac de 300 MCM con carga admisible de 235 Amp. a 440 volts pero trabaja con 300 Amp. a factor de potencia 70%. El problema consiste en calcular los KVAR capacitivos necesarios para reducir la corriente a 235 Amp.

$$KVA = \frac{\sqrt{3} \times 440 \times 300}{1000} = 228$$

$$KW = 228 \times 0.70 = 160$$

Con una corriente de 235 Amperes tendríamos:

$$KVA = \frac{\sqrt{3} \times 440 \times 235}{1000} = 179$$

El F.P. correspondiente a la nueva carga será:

$$\cos \varphi_2 = \frac{160}{179} = 0.895$$

y los KVAR capacitivos de :

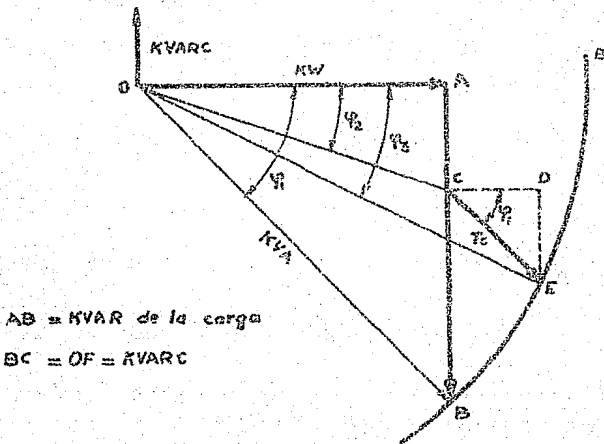
$$\begin{aligned} \text{KVARC} &= \text{KW} (\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2) = 160 (0.522) \\ &= 83.7 \end{aligned}$$

Usaremos la capacidad estandar americana de 90 KVAR .

Como hemos visto en este breve ejemplo la capacidad generadora de una planta, el aprovechamiento del equipo de transformación o del sistema de distribución pueden ser mejorados o aliviados al mejorar el factor de potencia de la carga.

Vamos a establecer, a continuación, el monto de carga adicional que se puede aprovechar con un equipo ya instalado.

La capacidad térmica, eléctrica o del sistema llamada también de descargo o de alivio se representa generalmente por  $T_c$  o  $S_c$  .



AB = KVAR de la carga  
BC = OF = KVARC

Fig.7

Como cualquier carga adicional puede ser añada gracias al alivio de capacidad al mejorar el factor de potencia a cualquier valor deseado distinto del original, no existe ninguna curva única que dé la carga permisible adicional. Se han establecido varias ecuaciones al respecto, unas aproximadas y otras que conservadoramente suponen que la carga adicional  $T_c$  se encuentra al mismo F.P. que la carga original.

La Fig.7 muestra el diagrama vectorial en el cual se basan todas las ecuaciones de carga adicional.  $T_c$  es la capacidad de descarga o adicional en KVA o por ciento de carga .

$\cos \varphi_1$  es el factor de potencia original.

$\cos \varphi_2$  es el factor de potencia mejorado de la carga original.

$\cos \varphi_3$  es el factor de potencia final de las cargas combinadas.

Como los KVA totales no pueden exceder de la carga original  $OB$  la circunferencia  $BB'$  fijará el límite de tal manera que  $OE$  deberá ser igual a  $OB$ . Vectorialmente  $\vec{OC} + T_c = \vec{OE} = \vec{OB}$  dónde :

$\vec{OC}$  = Carga original  $\vec{OB}$  + capacitores  $\vec{OF}$  o  $\vec{BC}$

$T_c$  (KVA) en términos de capacidad :

$$\% T_c = 100 \left[ \frac{KVARC \times \text{Sen } \varphi_1}{KVA} - 1 + \sqrt{1 - (\cos \varphi_1)^2 \left( \frac{KVARC}{KVA} \right)^2} \right]$$



Tc en términos de factor de potencia mejorado :

$$\%Tc = 100 \left[ \frac{\text{Sen } \varphi (\Delta \text{ tg } \varphi) \text{ Cos } \varphi_1 - 1}{\sqrt{1 - (\text{Cos } \varphi_1)^2 (\Delta \text{ tg } \varphi)^2}} \right]$$

dónde :  $\Delta \text{ tg } \varphi = \text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2$

Tc en términos de factor de potencia final de las cargas combinadas :

$$\%Tc = 100 \left( \frac{\text{Cos } \varphi_3}{\text{Cos } \varphi_1} - 1 \right)$$

En el caso más general Tc no se encuentra al mismo factor de potencia que la carga original ( Cos  $\varphi_1$  ) sino a un factor cualquiera Cos  $\varphi_x$

En estas condiciones, la ecuación más general es :

$$Tc \text{ (en KVA)} = \frac{a \text{ Cos } \varphi_x - b \text{ Sen } \varphi_x}{\sqrt{(a \text{ Cos } \varphi_x + b \text{ Sen } \varphi_x)^2 - (a^2 + b^2 - c^2)}}$$

Dónde y según la Fig.7. :

a = OA = Carga original en KW

b = AC = KVAR de la carga mejorada =

KVAR de la carga original - KVAR capacitivos

= AB = BC

c = OB = Carga original en KVA

$\varphi_x$  = Angulo de la carga de Tc.

Desde luego, no hay que olvidar el punto de vista económico - que es además el más importante - en el caso que estamos estudiando de aliviar al -

sistema de distribución. En muchos casos convendrá aumentar la capacidad del equipo en servicio : cables, líneas, transformadores, etc. pero recordando que la instalación de condensadores es, en general, más económica, tiene mayor flexibilidad (puesto que se puede instalar el banco de condensadores en cualquier instante en el centro de carga - más conveniente) y permite también resolver los puntos que trataremos a continuación, o sea : disminuir pérdidas y elevar la tensión.

b) Mejora de la tensión en la carga .

A causa de la resistencia y reactancia de las líneas, cables, transformadores, etc. en sistemas alimentadores se produce una caída de tensión proporcional a la longitud (d) y constantes R y X de la línea . Esta caída se puede expresar en porcentaje de la tensión inicial como :

$$\% e = \frac{KVA \times d \times (R \cos \varphi + X \sin \varphi)}{10 \text{ KV}^2}$$

dónde :

KVA = Carga trifásica

d = distancia en kilómetros

R = resistencia en ohms/Km

X = reactancia en ohms/Km

KV = voltaje entre fases

La reducción en tensión trae como consecuencia inmediata una reducción de corriente en la carga y

por lo tanto, un funcionamiento deficiente de motores, transformadores, soldadoras y demás equipo. Ahora bien, dónde ésta caída es más notable es en los alimentadores a baja tensión ( 220 V principalmente) con conductores largos y espaciados, en distribución aérea. Si la distribución se hace por medio de centros de carga a 440 o 600 Volts las caídas no sobrepasan generalmente de 4 a 5 %.

La instalación de capacitores cerca de la carga nos permite reducir ésta caída, al oponer corriente reactiva de sentido contrario a la corriente reactiva propia de la línea. La caída se reducirá proporcionalmente al producto de la corriente capacitiva por la reactancia del sistema.

Una de las ecuaciones más utilizadas para estos cálculos es :

$$\% V_c = \frac{KVARC (\% X_b)}{KVA \text{ base}} \quad \text{en donde}$$

$\% V_c$  es el porcentaje de variación o aumento de tensión debido a los capacitores.

$\% X_b$  es el porcentaje de reactancia del equipo (línea, transformadores) a la misma base que los KVA.

Si los capacitores se instalan en el secundario de un transformador, despreciando la reactancia de la línea de alimentación, se puede escribir la ecuación simplificada siguiente :

$$\% V_c = \frac{KVARC}{KVA \text{ del Transformador}} \quad X \quad (\% \text{ Reactancia Transformador})$$

Como vemos, la instalación de capacitores cerca de la carga nos aporta una ventaja más, pero que no se justifica totalmente en la mayoría de los casos si no viene acompañada de las ventajas de elevar el factor de potencia y reducir pérdidas, económicamente más importantes .

#### o) Pérdidas del sistema.

La reducción en pérdidas eléctricas debida al aumento del factor de potencia resulta en un provecho anual de casi un 15 por ciento de la inversión en capacitores. Por lo tanto, éste solo hecho justifica la instalación de capacitores estáticos .

En la mayoría de los sistemas de distribución de energía para fines industriales, las pérdidas eléctricas (  $R I^2$  ) varían desde 2.5 a 7.5 % de los kilowatt-horas de carga, dependiendo naturalmente del número de horas de plena carga y de suministro sin carga, del tamaño de conductores y de la longitud de los alimentadores principales y secundarios.

Los capacitores sólo podrán reducir la porción de pérdidas correspondientes a la corriente reactiva .

Las pérdidas eléctricas son proporcionales al cuadrado de la corriente y puesto que la corriente reactiva se reduce proporcionalmente al aumento

del factor de potencia, las pérdidas serán inversamente proporcionales al cuadrado del factor de potencia .

$$\text{Pérdidas en KW} \propto \left( \frac{\text{f.p. original}}{\text{f.p. mejorado}} \right)^2$$

o bien :

$$\text{Reducción en pérdidas} = 1 - \left( \frac{\text{f.p. original}}{\text{f.p. mejorado}} \right)^2$$

Esto es lo que viene mostrado en la gráfica (Fig.8) donde se hizo la suposición -generalmente cierta - de que la carga original queda constante.

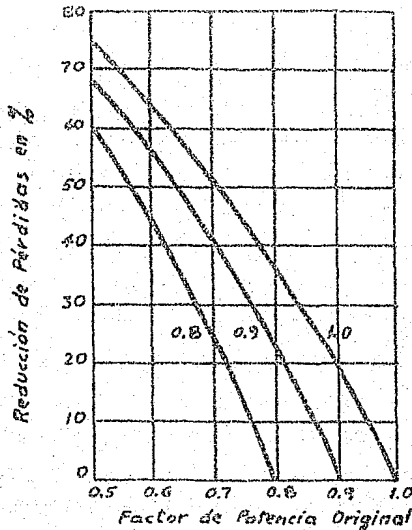


Fig. 8

En caso de querer obtener el porciento de reducción de pérdidas a partir de los KVA y KVAR de la carga y los KVAR del capacitor se puede utilizar la siguiente ecuación :

$$\text{Reducción en pérdidas} = \frac{\text{KVARC} ( 2 \text{ KVAR} - \text{KVARC} )}{\text{KVA}^2}$$

Si no fuera antieconómico distribuir capacitores en cada carga de un sistema, se podría obtener un beneficio neto gracias a la reducción de pérdidas . En condiciones normales se puede estimar en un 50 a 60% el ahorro en kilowatt-horas de reducción de pérdidas, tomando en cuenta la eficiencia de los propios capacitores que es muy elevada.

### CAPITULO III

#### APLICACION DE CAPACITORES

##### Localización de capacitores.

Son muchos los factores que influyen en la localización de capacitores como : el tipo de circuitos de una fábrica, la longitud de dichos circuitos, las variaciones de carga, el factor de potencia de la carga, el tipo de los motores, la distribución de cargas, el factor de diversidad de la carga, el número de horas de trabajo continuo, etc.

Tomando en consideración todos estos factores, los capacitores se instalarán, solos ó en bancos, bajo dos formas : a) para corrección en grupo, es decir para mejorar el factor de potencia global de una instalación - distribución urbana, fábrica ó planta - y b) para corrección localizada, junto a las cargas.

- a) La corrección en grupo se recomienda principalmente cuando cargas muy diversas se encuentran distribuidas en varios puntos de una fá-

brica ó planta y reciben la energía de alimentadores radiales. La corrección del factor de potencia, en este caso, se puede necesitar primero en una parte de la planta y, posteriormente en otra. En estas condiciones, el hecho de tener un grupo de capacitores concentrados en un punto presentará una gran ventaja al encontrarse éste punto practicamente a igual distancia de todas las cargas distribuidas, en cualquier momento.

Además de esto, si el grupo de capacitores se deja conectado durante un período de baja carga, el incremento de tensión no será excesivo, puesto que la reactancia de los alimentadores y demás circuitos no intervendrá en dicho aumento de tensión al estar el grupo de capacitores concentrado cerca del banco de transformadores.

Por otra parte, una aplicación individual de capacitores para cada motor representaría una inversión mucho mayor a causa de la diversidad de factores de potencia por corregir. Sería más práctico para el operador ir conectando o desconectando grupos de capacitores centralizados para llenar las condiciones de carga variable.

Sólo en el caso de alimentadores demasiado largos se justifica la conexión de grupos cerca de las cargas.



En el caso de tensiones de alimentación bajas como 210, 220 volts para motores, también se debe preferir la corrección en grupo, porque en bajas tensiones el costo por KVA es casi el doble que en altas tensiones, resultando más económica concentrar el banco de capacitores en el lado primario de 2400 a 7200 volts. Pero en estos casos, no siempre resulta económica la instalación antes del primario del banco de transformadores puesto que las pérdidas en alimentadores no quedan compensadas, ni se alivian los transformadores de sus KVA reactivos.

La corrección en grupo se localiza principalmente en los tres lugares siguientes :

- I - En el primario del banco de transformadores.
- II - En el secundario del banco de transformadores.
- III- En el exterior de un edificio.

b) Aplicación localizada.

Existen tres razones principales para instalar los capacitores tan cerca de la carga como sea posible, o bien en los extremos de los alimentadores y que son :

- 1º- Reducir las pérdidas de los circuitos intermedios entre las cargas y los -

TABLA IV

PORCIENTO APROXIMADO DE REACTANCIA DE TRANSFORMADORES  
(Para 60 cps. y en la base de la tensión y KVA nominales.)

TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION MONOFASICOS \*

KVA	VOLTAJE EN KV					
	.48 a 7.2	7.2 a 15	22.9	34.4	43.8	67
3 a 15	2.2	2.6	"	"	"	"
25 a 50	2.5	2.5	5.2	5.2	5.7	"
75 a 100	3.2	3.4	"	"	"	6.5
167	4.3	4.3	"	"	"	"
250 a 500	5.0	5.0	"	"	"	"

TRANSFORMADORES DE POTENCIA TRIFASICOS  
DE 750 KVA A 20000 KVA

VOLTAJE EN KV	% REACTANCIA ( X )
Hasta 25	5.5
34.5	6.0
46	6.5
69	7.0
92	9.0
115	9.5
138	10.0

\* Para bancos trifásicos el % X queda igual pero los KVA del Banco son iguales a 3 veces los KVA monofásicos .

T A B L A V

FACTORES DE REACTANCIA PARA CIRCUITOS TIPO CON CABLE

FACTOR XF (PARA 60 CICLOS)

	TENSION DEL CIRCUITO								
	220	240	440	480	550	2400	4160	4800	13800
	CABLE No 4 a No 1.								
3 Cables de 1 conductor en conduit de hierro	107.3	91	26.8	22.7	17.2	0.92	0.358	0.227	-----
Cable de 3 conductores en conduit o ferro de hierro	78.3	66.9	19.6	16.7	12.6	0.669	0.222	0.167	0.0276
3 Cables de 3 conductores en conduit o ferro de hierro	63.9	54.1	16	13.7	10.3	0.561	0.194	0.137	0.024
CABLE 1/0 a 4/0									
3 Cables de 1 conductor en conduit de hierro	101	85.5	25.25	21.3	16.3	0.855	0.318	0.213	-----
Cable de 3 conductores en conduit o ferro de hierro	74.2	62.	18.5	15.5	11.95	0.62	0.20	0.155	0.0237
Cable de 3 conductores en ferro no magnético	59.8	50.2	14.95	12.5	9.62	0.50	0.173	0.125	0.0205
CABLE 250 MCM a 750 MCM									
3 cables de 1 conductor en conduit de hierro	92.8	79	23.2	19.7	14.9	0.80	0.289	0.197	-----
Cable de 3 conductores en conduit o ferro de hierro	67.1	56.8	16.7	14.1	10.8	0.57	0.179	0.141	0.02
Cable de 3 conductores en ferro no magnético	55.8	47.7	13.9	11.9	8.97	0.477	0.159	0.119	0.0176

Estos factores son para circuitos trifásicos o de 2 fases 4 hilos. Para circuitos monofásicos, multiplíquese por 2 estos valores. Estos factores XF son iguales al porcentaje de reactancia de un circuito de 1000 ft. en base de 1000 KVA.

Para 50 ciclos, tomese la reactancia como  $\frac{50}{60} \times \text{XF tabulado}$ .

El porciento de reactancia de los conductores en una alimentación ( $\%X_L$ ) en la base ( $KVA_B$ ) - elegida se puede encontrar por medio de la ecuación :

$$\% X_L = \frac{X F \times l \times KVA_B}{1,000,000} \quad \text{en la cual:}$$

$XF$ , es el factor de reactancia de 1000 ft. de conductor en la base de 1000 KVA.

$l$ , es la longitud del circuito en piés.

$KVA_B$  son los KVA seleccionados como base.

Tomemos el ejemplo de un banco de capacitores conectados cerca de la carga en una red de alimentación según la fig. 9.

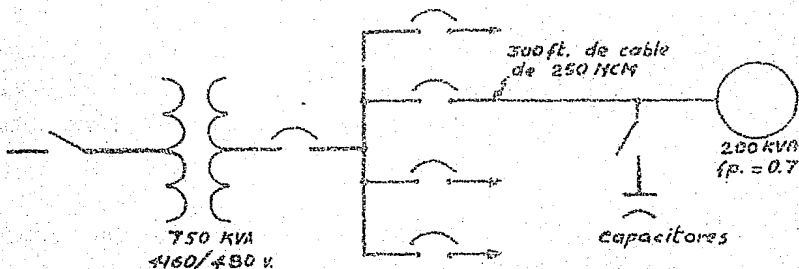


Fig. 9

Una carga de 200 KVA a  $\text{fp} = 0.7$  y 480 volts - está alimentada a través de 300 pies de cable de 250 MCM por un transformador de 750 KVA, - 4160/480 volts. La capacidad de corto circuito en el primario del transformador, dada por la Compañía alimentadora de energía eléctrica, es de 100 MVA.

Para mejorar el factor de potencia de la carga a 0.9, por ejemplo, necesitaremos 75 KVAR capacitivos, calculados por medio de la ecuación (3) y la tabla I :

$$\text{KVARC} = \text{KW} (\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2)$$

$$\text{KVARC} = 140 (0.536) = 75$$

Instalaremos por lo tanto un banco de capacitores estándar de 90 KVAR cerca de la carga que nos producirán un factor de potencia mejorado - de 93.6%.

Nuestro problema ahora consiste en conocer el - incremento de tensión, arriba de 480 volts, que aparecerá en la carga, al estar conectado dicho banco de capacitores.

Tomando 1000 KVA como base para nuestro cálculo, buscaremos las reactancias correspondientes al - circuito primario, al transformador y al circuito secundario .

Circuito primario :

Siendo la capacidad primaria de corto circuito de 100 MVA tenemos :

$$\% X = \frac{KVA_B \times 100}{KVA \text{ de corto circuito}}$$

$$\% X = \frac{1000 \times 100}{100000} = 1.0 \%$$

Reactancia del transformador.

Según nuestra Tabla IV la reactancia de un transformador trifásico de 750 KVA es de 5.5 y a la base de 1000 KVA será :

$$\% X_T = \frac{1000 \times 5.5}{750} = 7.33 \%$$

Reactancia del Cable.

Según la Tabla V el factor de reactancia de 1000 ft. de cable de 250 MCM en conduit de hierro y a 480 volts es de 14.1 y el porciento de reactancia será de :

$$\% X_L = \frac{14.1 \times 300 \times 1000}{1\ 000\ 000} = 4.23 \%$$

El porciento total de reactancia es pues la suma, o sea :

$$\% X_p = 1.0 + 7.33 + 4.23 = 12.56$$

El porciento de aumento de tensión debido a los

capacitores será según la ecuación :

$$\% V_c = \frac{KVARC (\% X_b)}{KVA_B}$$

$$\% V_c = \frac{90 \times 12.56}{1000} = 1.13$$

El aumento de tensión en la carga alcanzará el valor de :

$$\text{Aumento de tensión} = 480 \frac{1.13}{100} = 5.4 \text{ volts}$$

Este aumento es incapaz de afectar a los capacitores puesto que no sobrepasa su tensión máxima permisible y por lo contrario permite compensar la caída de tensión producida por la reactancia de los cables y transformadores.

3°- Otra de las razones importantes para localizar los capacitores cerca de la carga es la de evitar la conexión y desconexión constantes del banco de condensadores.

Un banco de capacitores centralizado, es forzadamente de mayor capacidad que bancos distribuidos y por lo tanto, en periodos de baja carga - o carga nula - las sobretensiones producidas por el primer sistema mencionado serán mayores e inclusive podrían hacer peligrar a los propios capacitores. Para evitar este fenómeno es necesario conectar y desconectar sucesivamente un número dado de capacitores según

varie la carga, principalmente en los fines de semana y durante las horas no laborables. Como hemos podido observar en el problema tratado en el párrafo anterior, la inclusión de una carga capacitiva relativamente reducida cerca de la carga, sólo ha elevado la tensión en un 1.13% mientras que un banco centralizado de 500 a 600 KVA capacitivos puede llegar a elevar la tensión en un 10 a 12%, alcanzando los límites máximos permisibles a carga nula.

Por lo tanto se podrá evitar la necesidad de conectar y desconectar continuamente capacitores al distribuirlos adecuadamente en porciones cerca de las cargas respectivas.

Según este breve análisis la corrección o aplicación localizada se utiliza principalmente en los tres lugares siguientes :

- IV) En alimentadores pequeños.
- V) En circuitos ramales de motores.
- VI) Conectando capacitores directamente y simultáneamente con motores o grupo de motores al arrancar estos últimos.

Según este breve estudio sobre localización de capacitores se comprenderá la necesidad de utilizar dos tipos principales de bancos de condensadores dependiendo de las tensiones de aplicación por una parte y del volumen de capacidad requerida por otra .

En aplicación localizada necesitaremos pocos KVA capacitivos en baja tensión : 210 a 600 volts que son los voltajes usuales para motores, soldadoras, hornos, etc.



En aplicación centralizada, por lo contrario, se necesitarán relativamente grandes cantidades de KVA capacitivos de fácil seccionalización y generalmente en tensiones primarias medias : 2400 a 13800 volts, a menos de colocar el banco en el secundario de los transformadores de distribución, a las tensiones bajas mencionadas anteriormente.

El costo por KVAR capacitivo varía mucho con el voltaje de aplicación, siendo excesivo a 220 o 230 volts y mucho más económico a 460 o 2400 volts. El motivo de esto es puramente constructivo. El espesor de un aislamiento o de un dieléctrico, en el caso de capacitores, es directamente proporcional al voltaje, luego en 230 volts necesitaríamos utilizar papel muy delgado, de espesor perfectamente uniforme y libre de impurezas lo cual en la práctica es muy difícil de obtener. En consecuencia se utiliza prácticamente el mismo espesor de dieléctrico en 230 que en 460 volts y para un número inferior de KVAR capacitivos, aumentando el costo por KVAR en forma exagerada.

Por otra parte el costo de los fusibles necesarios para aislar cada capacitor y proteger así el resto del banco es el mismo en 230 que en 460 volts, contribuyendo aún más en el exceso de costo mencionado.

Por todas estas razones se prefieren en la práctica las tensiones, comprendidas entre 440 y 2400 volts, como más económicas.

A continuación presentaré una Tabla de costos relativos y de costos por KVA para diferentes tensiones usuales en México y Estados Unidos :

TABLA VI

Voltajes	Costo relativo de capacitores independientes	Costo por KVA	
		Bancos pequeños hasta 180 KVAR	Bancos de 360 KVAR y mayores
230	1.75	232	255
460	1	122	157
575	1	122	157
2400	0.75	95	110
4160	0.75	95	110
7200	1.60	"	250
13800	1.60	"	250

En conclusión, si tomamos en cuenta las necesidades del industrial medio de la República y que son el mínimo de operaciones y de mantenimiento del equipo así como la economía de la instalación, la tendencia general será de colocar un banco de capacitores centralizado en el lado de baja tensión del banco de transformadores de la subestación para compensar la potencia reactiva de dicho banco y secundariamente, colocar bancos pequeños cerca de los centros de carga principales para la compensación de KVA reactivos en los circuitos ramales, si es necesario.

Las tensiones más usuales en México, para estos fines son 220, 440 volts y en algunas industrias textiles (del Estado de Puebla principalmente) 550 volts.

El capacitor tipo serie.

El capacitor tipo serie, o sea el que se conecta en serie con algún circuito eléctrico determinado, se

usa principalmente en líneas de transmisión, en circuitos de distribución, como equipo de protección durante fallas en líneas, como regulador de la tensión, y en soldadoras eléctricas de corriente alterna.

En líneas de transmisión largas, el capacitor tipo serie permite compensar la reactancia de la línea que aumenta directamente con la distancia y que presenta un verdadero problema de estabilidad de la transmisión y de regulación de la tensión. El rango de tensión del capacitor deberá escogerse sobre la base de la máxima carga continua supuesta para la línea, y no según la tensión que aparezca durante períodos de falla. Esto es debido a que el costo de la reactancia capacitiva aumenta proporcionalmente con el cuadrado del rango de tensión. Para limitar el voltaje aplicado al capacitor serie durante una falla y no dañar su aislamiento se tiene que colocar un elemento derivador operado automáticamente por alguna protección adecuada.

En circuitos de distribución dónde existen variaciones bruscas de carga como : bombas recíprocas, motores reversibles, soldadoras, es conveniente instalar capacitores del tipo serie que sirven como reguladores automáticos de tensión de respuesta prácticamente instantánea. Este tipo de regulación se justifica sobre el regulador tipo transformador, en circuitos largos de más de 2400 volts y que suministran poca potencia. También, si el factor de potencia de la carga es excesivamente bajo, se debe escoger el capacitor tipo serie en caso de que el tipo "shunt" o derivado no llene el propósito deseado.

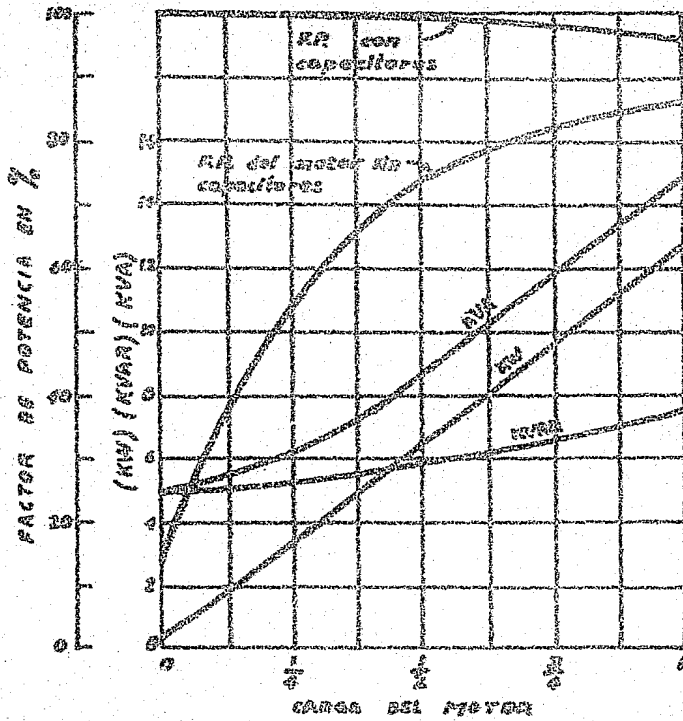


Fig. 10

El uso del capacitor tipo serie es muy delicado, por las razones expuestas anteriormente y también porque entra en resonancia fácilmente cuando las corrientes de carga contienen componentes armónicas o subarmónicas de gran amplitud.

Por todas estas razones es necesario conocer perfectamente las características del circuito antes de introducir un capacitor si se quiere obtener una operación adecuada.

#### El capacitor tipo "shunt" o derivado.

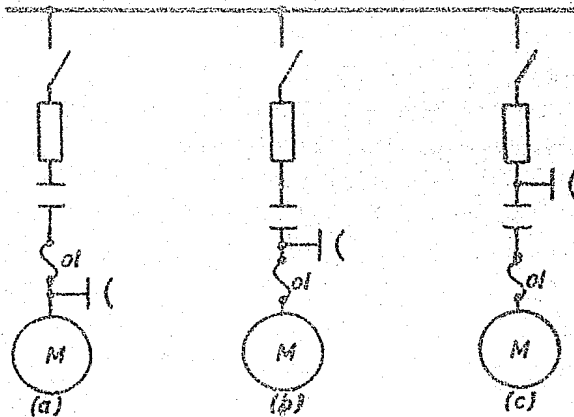
Como ya explicamos anteriormente debe preferirse la conexión de bancos de capacitores centralizados en el secundario de los transformadores de distribución cuando existe diversidad de motores de distintas características y que operan a distintas horas del día, pero cuando no existe una gran cantidad de motores pequeños y de muy diversas características entonces es preferible aplicar capacitores individuales conectados simultáneamente con cada motor.

En la Fig.10 podemos observar como se uniformiza el factor de potencia de un motor de inducción típico de 70 HP y velocidad media al instalarle un capacitor trifásico de 5 KVA.

Generalmente los motores de inducción no trabajan a plena carga resultando una operación a bajo factor de potencia, pero como la potencia necesaria para magnetizar el campo, o sea los KVA reactivos, no varía notablemente entre los límites de operación a plena carga y sin carga, es muy fácil aplicar KVA capacitivos de valor fijo para obtener, bajo cualquier carga, un factor de potencia alto y casi constante, como el mostrado en la figura anterior.

Los pequeños bancos de capacitores o capacitores individuales del tipo "derivado" utilizados directamente con algún motor de inducción determinado se conectan, según el caso, en cualquiera de las tres formas (a), (b) o (c) de la Fig. 11 .

Fig. 11



Las dos formas de conexión (a) o (b) deben preferirse siempre sobre la (c) para poder conectar y desconectar simultáneamente al motor y al capacitor por medio del contactor del aparato de arranque a tensión completa

"Linestarter" o a tensión reducida "Autostarter", según la potencia y operación del motor). De esta manera el capacitor estará en servicio exclusivamente cuando opere el motor.

La localización mostrada en la Fig.11 (a) se recomienda para nuevas instalaciones dónde se puedan seleccionar los elementos o bobinas de sobrecorriente (OL) sobre la base de la reducción de corriente de línea debida a los capacitores; además, por medio de esta conexión se reduce la corriente de corto circuito en los capacitores gracias a la impedancia del relevador de sobrecorriente.

En el caso de instalaciones ya existentes es preferible localizar el capacitor en la posición Fig.11 (b) para no modificar el rango de corriente del relevador de sobrecorriente y sin embargo conservar la ventaja principal del caso anterior o sea la utilización simultánea del capacitor y del motor.

Este tipo de localización tiene dos limitaciones que hay que tomar en cuenta antes de aplicar capacitores en conjunto con motores y que son el sobrevoltaje debido a autoexcitación y los pares transitorios.

#### Sobrevoltaje debido a la autoexcitación.

El capacitor puede entregar al motor toda o parte de la corriente necesaria para magnetizar su campo. Entonces, cuando se interrumpa la corriente de línea del motor este seguirá recibiendo corriente del capacitor, con la cual autoexcitará su campo trabajando como generador de tensión .

La magnitud de esta tensión dependerá de la capacidad de corriente del condensador y de la velocidad del motor y puede producir fallas en el aislamiento, tanto del motor, como del propio condensador. En la Fig.12 aparece la característica de excitación en vacío (N) típica de un motor y la magnitud de la tensión debida a autoexcitación para varias capacidades en porcentaje de la corriente total de excitación sin carga.

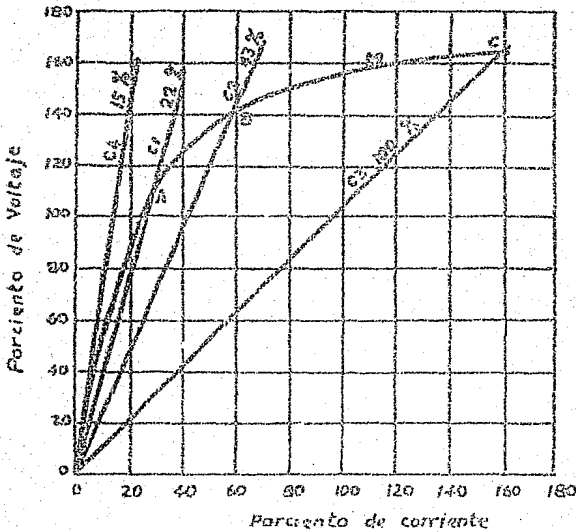


Fig.12



El punto A indica el porcentaje de corriente magnetizante sin carga y a tensión normal. Las curvas C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, y C<sub>3</sub> muestran la característica en voltamperes de capacitores de varios valores. Las curvas C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> y C<sub>3</sub> son de capacitores cuyos KVAR son mayores que los KVAR magnetizantes del motor que, por lo tanto, se autoexcitará. La tensión final de autoexcitación, suponiendo la velocidad constante, aparece en la intersección de las dos curvas y puede llegar hasta 165% de la tensión normal, lo cual es totalmente inaceptable.

En las aplicaciones comunes de motores su velocidad decrece rápidamente al interrumpirle la alimentación, eliminándose la autoexcitación, lo cual provoca una caída brusca de la tensión mencionada. Pero donde existe mayor peligro es en motores con carga de alta inercia - donde esta sobre tensión puede durar varios minutos y provocar las fallas indicadas anteriormente.

#### Pares transitorios.

Se han llegado a obtener pares transitorios hasta de 20 veces el par a plena carga cuando se desconecta simultáneamente con el motor un capacitor excesivamente grande.

Estos pares transitorios aparecen sobre todo cuando el motor pasa de tensión reducida a tensión normal por medio de un auto-transformador o cuando se desconecta momentáneamente y se vuelve a introducir en la línea mientras esté girando y sosteniendo una tensión - debida a la autoexcitación. Desde luego, la tensión de autoexcitación debe ser de altas proporciones y estar

fuera de fase con la línea al reconectar al motor para que aparezca el par transitorio. En ciertos casos este par es capaz de producir torsiones en la flecha o rupturas de otros elementos giratorios acoplados.

Para evitar estos inconvenientes, la NEMA recomienda escoger los capacitores directamente acoplados a motores trifásicos de inducción del tipo abierto o a prueba de salpicadura de 220, 440, 550 o 7500 volts, según las Tablas VI y VII que publicamos a continuación.

TABLA VII  
**PAR Y CORRIENTE DE ARRANQUE NORMALES**  
**MOTORES "NEMA" B**

HP	RPM. Nominales y N° de Polos											
	3600 2		1800 4		1200 6		900 8		720 10		600 12	
	kvar	% AR	kvar	% AR	kvar	% AR	kvar	% AR	kvar	% AR	kvar	% AR
3	1.5	14	1.5	15	1.5	20	2	27	2.5	35	3.5	41
5	2	12	2	13	2	17	3	25	4	32	4.5	37
7½	2.8	11	2.5	12	3	15	4	23	5.5	30	6	34
10	3	10	3	11	3.5	14	5	21	6.5	27	7.5	31
15	4	9	4	10	5	13	6.5	18	8	23	9.5	27
20	5	9	5	10	6.5	12	7.5	16	9	21	12	25
25	6	9	6	10	7.5	11	9	15	11	20	14	23
30	7	8	7	9	9	11	10	14	12	18	16	22
40	9	8	9	9	11	10	12	13	15	16	20	20
50	12	8	11	9	13	10	15	12	19	15	24	19
60	14	8	14	8	15	10	18	11	22	15	27	19
75	17	8	16	8	18	10	21	10	26	14	32.5	18
100	22	8	21	8	25	9	27	10	32.5	13	40	17
125	27	8	26	8	30	9	32.5	10	40	13	47.5	16
150	32.5	8	30	8	35	9	37.5	10	47.5	12	52.5	15
200	40	8	37.5	8	42.5	9	47.5	10	60	12	65	14
250	50	8	45	7	52.5	8	57.5	9	70	11	77.5	13
300	57.5	8	52.5	7	60	8	65	9	80	11	87.5	12
350	65	8	60	7	67.5	8	75	9	87.5	10	95	11
400	70	8	65	6	75	8	85	9	95	10	105	11
450	75	8	67.5	6	80	8	92.5	9	100	9	110	11
500	77.5	8	72.5	6	82.5	8	97.5	9	107.5	9	115	10

% AR = Porcentaje de Reducción de corriente de línea debida a los capacitores.

TABLA VII

ALTO PAR DE ARRANQUE, BAJA CORRIENTE  
DE ARRANQUE.  
MOTORES "NEMA" C

HP	R.P.M. Nominales y N° de Poles									
	1800 4		1200 6		900 8		720 10		600 12	
	kvar	% AR	kvar	% AR	kvar	% AR	kvar	% AR	kvar	% AR
3	...	..	2	26	3	31	4	40	4.5	41
5	2	15	2.5	21	4	29	5	36	6.5	46
7½	2.5	13	3.5	18	5	27	6.5	34	8	41
10	3.5	13	4	16	6	25	8	32	9.5	39
15	5	12	5.5	14	8	21	10	28	13	36
20	6	12	6.5	13	9.5	19	12	25	17	35
25	7.5	12	8	12	11	17	14	24	20	33
30	8.5	12	9	12	13	17	16	23	23	32
40	11	11	12	11	16	16	20	22	30	30
50	13	11	16	11	20	16	25	21	35	29
60	16	11	19	11	23	15	27.5	20	40	27
75	21	11	24	11	27.5	14	35	19	45	25
100	28	11	32.5	11	35	13	42.5	19	55	24
125	35	11	40	11	42.5	13	50	19	...	...
150	42.5	11	45	11	50	13	55	19	...	...
200	50	11	53	11	60	13	...	...	...	...

### EL MOTOR Y EL CONDENSADOR SINCRONOS

El capacitor estático o condensador, del cual hemos venido hablando hasta ahora no es la única solución, desde luego, para mejorar el factor de potencia. Como ya fué mencionado en los primeros párrafos de este trabajo, existen también el condensador síncrono y el motor síncrono que resuelven el problema. Ahora bien, para que el empleo de un motor síncrono sea lo más económico posible es necesario utilizar a este último principalmente como motor primo, es decir para impulsar maquinaria. Por esta razón la base de la comparación deberá ser entre el motor de inducción con capacitores y el motor síncrono. El condensador síncrono solo se justifica en muy grandes instalaciones.

Se puede realmente considerar al motor síncrono o al condensador síncrono como un generador de Kilo volt- amperes reactivos al igual que un generador convencional. El número de KVAR generados dependerá de su excitación y, para el motor síncrono, de la carga aplicada. Si su excitación es baja, no alcanzarán ni siquiera a suplir sus propias necesidades para magnetizar su campo y deberán absorber KVA reactivos de la línea (trabajan con factor de potencia atrasado); en cambio si se sobreexcitan, serán capaces de suplir a sus necesidades y además de entregar KVA reactivos a la línea (trabajan con factor de potencia adelantado).

Las curvas de la Fig. 13 nos dan idea de los KVA reactivos que puede entregar un motor síncrono bajo varias condiciones de carga y excitación normal. Con altas

sobrecargas, el motor tomará corriente magnetizante de la línea.

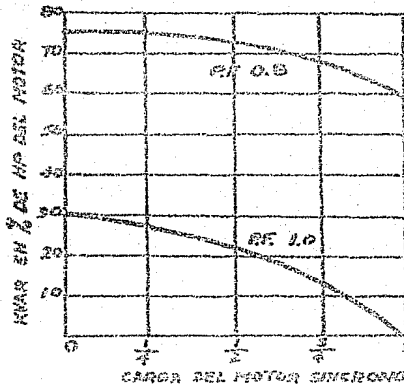


Fig.13

Los valores de factor de potencia de operación más usuales de un motor sincrónico son 1 y 0.8 adelantado con excitación normal y a plena carga.

Motor de inducción y capacitor frente al motor sincrónico.

Los factores principales que hacen preferir la selección del capacitor con respecto al motor sincrónico para mejorar el factor de potencia son primeramente, el costo inicial del equipo y el mantenimiento, el tiempo de operación del equipo y su aprovechamiento, la tensión de alimentación, así como la capacidad y requisitos propios de la fábrica.

En la industria pesada y en fábricas de gran capacidad donde se requieran uno o varios motores mayores de unos 300 HP, o de velocidad variable como en laminadoras, se impone desde luego el motor síncrono. Pero si la fábrica debe emplear principalmente motores de potencia media o baja y de velocidad constante, entonces es mucho más económico y conveniente utilizar motores de inducción de jaula de ardilla o de rotor devanado (para variaciones de velocidad).

El motor síncrono tiene la ventaja de proporcionar cantidades progresivamente variables de KVA reactivos, rápidamente cambiadas al ajustar el reóstato de campo del motor. Como podemos observar en las curvas de la figura 13, la cantidad de KVAR suministrados a la línea aumenta al disminuir la carga. Sin embargo, hay poca diferencia en el suministro neto de kilovars al variar la carga entre un motor síncrono de campo fijo y un motor de inducción con capacitores seleccionados para el mismo valor de kilovars a plena carga del motor síncrono. Esto viene a decir que la pequeña variación de kilovars de un motor síncrono solo representa una ligera ventaja.

Al punto de vista de las pérdidas, los dos equipos vienen siendo equivalentes. El motor síncrono es generalmente más eficiente que el de inducción, pero si incluimos las pérdidas por excitación en un síncrono obtenemos una equivalencia casi exacta.

Ahora bien, el motor síncrono tiene la desventaja, además del alto costo del equipo (motor síncrono, motor de corriente continua, baterías o sistema de rectificación; reóstato de campo; cimentación propia a toda

máquina rotatoria y espacio ocupado) y del costo de mantenimiento (engrasado, reposición de carbones, ventilación adecuada) ya señalados anteriormente, de tener que estar en operación continua para generar kilovars. Sin embargo, los capacitores pueden estar en conexión permanente y no causar gastos de operación, lo cual, al punto de vista de las pérdidas de operación, puede representar una desventaja enorme para el motor síncrono.

Indicaremos finalmente que en caso de falla de cualquiera de los dos equipos es a menudo más económico reponer uno o varios capacitores que reparar un motor síncrono.

#### Selección de capacitores para México.

Según se ha podido ver en el capítulo relativo a la "Aplicación de capacitores" (Cap.III), la demanda en México de tales aparatos eléctricos generalmente interesa a dos tipos de clientes principales : a) las compañías de distribución de energía eléctrica, por una parte y, b) la industria media y relativamente grande, por otra.

Ahora bien, la mayoría de las compañías de distribución eléctrica, así como la Comisión Federal de Electricidad, utilizan bancos de capacitores para uso a la intemperie en tensiones altas o medias desde 2400 hasta 13800 volts, en subestaciones receptoras principalmente. También utilizan, aunque en muy pequeño número, capacitores para líneas de distribución urbanas, montados sobre postes o sea a la intemperie.

En la fábrica que proponemos a continuación, no se elaborará por lo pronto este tipo de capacitores



intemperie por necesitar de una protección contra oxidaciones, temperaturas, cortos circuitos en líneas, etc. que aumentaría mucho su costo y cuya fabricación en el extranjero (Europa principalmente) será durante muchos años más barata que en México, a pesar de las tarifas arancelarias que se pudieran obtener del Gobierno de la República.

Dentro del segundo tipo de cliente existe la industria pesada, donde no siempre será muy fácil colocar capacitores por múltiples razones. En primer lugar, muchas de ellas generan su propia energía eléctrica en el lugar mismo de consumo, no teniendo prácticamente nada de caída de tensión, ni pérdidas en transmisión de energía, ni tarifas de castigo por bajo factor. Por otra parte utilizan gran número de motores de alta potencia, principalmente síncronos, que resuelven el problema del bajo factor de potencia de operación de la planta.

El pequeño industrial, por su parte, al tener un bajo consumo de energía eléctrica y una baja carga contratada, paga una factura relativamente baja. El ahorro que pudiera tener al mejorar su factor de potencia se justifica ni amortiza rápidamente la erogación correspondiente a la instalación de un banco de capacitores.

Además de esto, si consideramos que la mayoría de las compañías de energía eléctrica de los Estados, incluyendo la Comisión Federal, carecen de equipos medidores suficientes, y por lo tanto, quedan en la imposibilidad de aplicar tarifas de castigo por bajo factor de potencia, comprenderemos que las posibilidades de mercado para capacitores quedan prácticamente limitadas al industrial medio del Centro de la República, de Puebla, Veracruz y algo de Nuevo León.

Este tipo de cliente necesitará primordialmente bancos de capacitores centralizados en el lado de baja tensión de su subestación reductora; secundariamente pequeños bancos o capacitores aislados interconectados a sus motores.

Las tensiones de distribución en alimentación más usuales en nuestro país son, como ya hemos indicado : 220, 440 y 550 volts, tres fases, cincuenta o sesenta ciclos por segundo.

La mayoría de los fabricantes tanto Americanos como Europeos construyen capacitores trifásicos de 230, 460 y 575 volts, adaptados por lo tanto a nuestras tensiones de trabajo de motores con un 5% de sobrevoltaje con respecto al nominal, más el 10% permisible según el diseño propio del capacitor (standard AIEE 18-202).

Las unidades trifásicas estandard más comunes a 60 cps son para la "Siemens Schuckert" y los "Ateliers de Constructions Electriques de Charleroi (ACEC) :

3, 7.5, 10, 12.5, 20 y 25 KVAR

Para la Westinghouse, General Electric, Line Material y otras grandes empresas americanas :

2.5, 5, 7.5 y 15 KVAR en 230 volts y 5, 10, 15 KVAR en 460 volts.

La Sprague fabrica unidades básicas de 1 y 2 KVAR en 230 volts y 2.5, 3 y 5 KVAR en 460 y 575 volts.

Entre las distintas unidades enumeradas anteriormente, las más convenientes, en mi opinión, para usar se en México son :

2.5 y 3 KVAR a 230 volts, tanto para 50 como para 60 ciclos por segundo.

5 y 7.5 KVAR a 460 y 575 volts, en las mismas frecuencias.

Estas unidades por ser pequeñas, tienen mayor flexibilidad o adaptabilidad a los requisitos de pequeñas y medianas industrias, además de ser más fácil su reposición dentro de un banco de capacitores o como elementos individuales .

Ahora bien, como el monto de KVAR de un capacitor determinado depende directamente de la frecuencia de aplicación, podremos producir inicialmente unidades monofásicas para 50 ciclos por segundo tales como 2.5 KVAR a 230 volts y 5 KVAR a 460 volts que se podrán usar en 60 cps como unidades de 3 KVAR y 6 KVAR respectivamente según la relación :

$$\text{KVARC actuales} = \text{KVARC nominales} \frac{\text{frecuencia de operación}}{\text{frecuencia nominal}}$$

Con estas unidades podremos obtener bancos trifásicos unitarios de :

7.5 KVAR, 50 cps. y 9 KVAR, 60 cps en 230 volts

15 KVAR, 50 cps y 18 KVAR, 60 cps en 460 volts

Con estos bancos trifásicos podremos adaptarnos a los volajes estándares fijados por la NEMA (pero en 50 cps) indicados en la Tabla VIII .

TABLA VIII

VALORES EN KVAR PARA RANCOS DE CAPACITORES A 50 C.P.S.

230 volts	460 y 575 volts
15	30
30	60
45	90
60	120
90	180
180	360
270	540
450	900
630	1260

Determinación aproximada de la capacidad de producción de capacitores para México.

Según datos estadísticos tomados entre los años de 1939 a 1949, recopilados en el estudio "Generación y Distribución de Energía Eléctrica en México" por el departamento de Investigaciones Industriales del Banco de México, y datos verbales solicitados a la Compañía de Luz y Fuerza y a la Comisión Federal de Electricidad, presentaré un breve resumen de la capacidad eléctrica instalada y el consumo de energía en la República, que permita determinar aproximadamente el volumen de capacitores necesarios para fines de mejoramiento del factor de potencia en instalaciones industriales exclusivamente.

A partir de los datos publicados en el Estudio mencionado, la capacidad nominal instalada hasta fines de 1950 por las 7 principales compañías del país era :

- |                                                                                  |            |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1- Cia Mexicana de Luz y Fuerza Motriz S.A.                                      | 456,820 KW |
| 2- Interconectado Puebla-Veracruz                                                | 62,074 "   |
| 3- Interconectado Guanajuato                                                     | 42,175 "   |
| 4- Interconectado Torreón-Laguna-Chihuahua                                       | 87,250 "   |
| 5- Plantas aisladas representadas por la<br>Cia Impulsora de Empresas Eléctricas | 42,246 "   |
| 6- Nueva Cia Eléctrica Chapala                                                   | 98,800 "   |
| 7- Comisión Federal de Electricidad (no<br>interconectados a los anteriores)     | 97,846 "   |

887,211 KW

Si incluimos la producción de energía de empresas privadas y servicios mixtos llegaremos a un total de capacidad instalada en la República de :

1,007,673 KW en 1950

La capacidad instalada en la actualidad asciende aproximadamente al valor de : 1,700,000 KW, según datos de la Comisión Federal de Electricidad .

Los Estados de la República más industrializados hasta 1950 y por orden de capacidad instalada eran :

- Puebla .....	161,820 KW
- Distrito Federal ...	110,000 "
- Michoacan .....	79,682 "
- México .....	72,436 "
- Veracruz .....	68,892 "
- Durango .....	58,900 "

con un total de 551,730 KW instalados

Considerando el incremento de capacidad existente entre los años de 1950 a 1954 como de 60%, tan solo en los 6 Estados mencionados anteriormente, llegamos a un total de capacidad de 885,000 KW para 1954 .

En 1950 también los clientes industriales consumían el 42.2% de la energía producida por las plantas de servicios públicos, con una carga media fluctuando entre 70 y 80% desde 1939 hasta 1953. Actualmente el consumo industrial ha aumentado al 56% .

Considerando en la actualidad una carga promedio de 85%, relativamente alta a causa del intenso desarrollo industrial que se ha producido en estos últimos años, podremos establecer dos valores aproximados de la carga, en Kilowatts en la República y en los seis Estados más industrializados del país :

Capacidad instalada en la República	1,700,000 KW
" " " en los 6 Estados principales	885,000 "
Factor de carga 85%	
Carga en la República	1,450,000 "
" " en los 6 Estados mencionados	750,000 "

Ahora, tomando en cuenta exclusivamente la carga industrial de 56% obtenemos las cifras:

Carga industrial en la República	810,000 KW
" " " los 6 Estados	420,000 "

Según datos del Estudio mencionado, el 30% de los industriales trabajan a una frecuencia de 50 ciclos por segundo y el 68% a 60 ciclos por segundo, luego tendremos una carga repartida entre las dos frecuencias de:

Carga en la República a 50 cps	244,000 KW
" " " " a 60 cps	552,000 "
" " los 6 Estados a 50 cps	126,000 "
" " " 6 " a 60 "	286,000 "

Podemos considerar que el 50% de esta carga industrial trabaja a bajo factor de potencia, tomando en cuenta que muchas grandes industrias poseen motores síncronos para mejorar su factor de potencia y que muchos pequeños industriales no podrán o no querrán sufragar los gastos de una instalación de capacitores.

En conclusión obtendremos cargas en kilowatts correspondientes a los cuatro grupos anteriores con un valor de:

Carga indust. de bajo FP. en la República a 50 cps	122,000 KW
" " " " " " " " " 60 "	276,000 "
" " " " " " en los 6 Estados " 50 "	63,000 "
" " " " " " " " " " " 60 "	143,000 "

Ahora bien, no es muy arriesgado suponer que en la mayoría de las industrias que trabajan con bajo factor de potencia éste fluctúa entre 60% y 75%, por lo tanto -

tomaremos 70% como valor inicial. Por otra parte el factor se puede incrementar a cualquier valor desde 80%, valor mínimo exigido por las compañías, hasta 100%, pero generalmente no conviene aumentar a más de 90% para no tener al mismo tiempo un gasto de equipo excesivo. Por esta razón escogeremos como valor promedio final el de 85%.

Para estos dos valores : inicial y final, y según la Tabla I, necesitaremos producir una capacidad total, tanto para 50 cps como para 60 cps de :

122,000	x	0.4	=	48,800	KVARC	a	50	cps
276,000	x	0.4	=	110,400	"	a	60	"
63,000	x	0.4	=	25,200	"	a	50	"
143,000	x	0.4	=	57,200	"	a	60	"

Producción global en 50 cps para las necesidades de la República : ..... 48,800 KVARC

Producción global en 60 cps para las necesidades de la República : ..... 110,400 "

Producción global en 50 cps para las necesidades de los 6 Estados más industrializados : ..... 25,200 KVARC

Producción global en 60 cps para las necesidades de los 6 Estados más industrializados : ..... 57,200 "

A pesar de lo que nos indican estas cifras comparativas de las necesidades en 50 y 60 ciclos por segundo, la realidad de las cosas por lo que respecta a volumen de ventas entre estas dos frecuencias, según información de los representantes de capacitores Sprague, Westinghouse y Line Material, es que se vende un 80% para 50 cps, y un 20% para 60 cps. Esto queda plenamente justificado, según indicamos en nuestro párrafo "Selección de capacitores para México" donde aparece que el mayor número de clientes probables será el del centro de la República abastecidos a 50 cps por la Compañía de Luz y Fuerza Motriz S.A. Existe la tendencia de invertir esta relación de ventas, pero no será hasta dentro de varios años que se obtenga un resul-

tado positivo al uniformizar las frecuencias en el país lo cual está supeditado a factores de orden económico y político antes que nada.

Tratando de llenar el máximo de las necesidades actuales, como punto de partida, lo más importante en mi concepto será de fabricar inicialmente capacitores estandar para 50 cps ( que son utilizables en 60 cps, pero con mayor capacidad que la nominal) y más tarde elaborar diseños para 60 cps. Sin embargo, deberemos considerar en nuestra fábrica la capacidad de producción correspondiente a capacitores de 60 cps aunque inicialmente se trabaje con menor capacidad, de tal manera que podamos englobar rápidamente la posible demanda futura. En consecuencia llegamos a una cantidad de KVARC totales necesarios de : 159,200 KVAR capacitivos.

Ahora bien, suponiendo lo que falta por instalarse de un 75% de la cantidad anterior, obtenemos en cifras redondas : 120,000 KVAR capacitivos.

Podemos estimar que bajo la base de cubrir las necesidades en dos años (17 meses de trabajo efectivo) y tomando en cuenta un mercado próximo futuro del 15% anual deberemos tener una producción mensual aproximada de 9200 KVARC.

La relación de ventas actuales, por lo que toca a tensiones comerciales es de :

60% para 230 volts y  
40% " 460 "

lo cual nos llevaría a una producción mensual de 5520 KVARC para 230 volts y 3680 KVARC para 460 volts en dos tamaños exclusivamente, para no complicar demasiado los procesos de manufactura, perfeccionar lo mejor posible los primeros modelos que se fabriquen y obtener al mismo tiempo bancos de capacitores en paralelo que se ajusten mejor a las necesidades precisas del cliente.



Por lo tanto, escogeremos 2.5 KVAR en 230 volts y 5 KVAR en 460 volts.

Inicialmente podremos tener una producción de :

2250 piezas mensuales de 2.5 KVAR

750 " " de 5 KVAR

El número de piezas está ligeramente aumentado en previsión de las que pudieran salir defectuosas.

Si suponemos 25 días hábiles por mes, obtendremos una producción diaria de :

90 piezas diarias de 2.5 KVAR

30 " " de 5 KVAR

La misma maquinaria y los mismos operarios podrán ser empleados para los dos tipos de capacitores por ser tan corta la diferencia entre los dos modelos.

## CAPITULO IV

### ESTUDIO Y DISEÑO DE LOS CAPACITORES PROPUESTOS

#### Condensador.

El condensador también llamado capacitor es, en principio, un aparato eléctrico constituido por dos placas metálicas separadas y aisladas entre si por un elemento aislante que puede ser gaseoso, líquido o sólido. A cada una de las placas se le denomina "armadura" y al elemento aislante intermedio "dieléctrico".

#### Capacidad.

La capacidad de un condensador depende principalmente de las características físicas del dieléctrico, de su espesor y de la superficie de las armaduras.

Se llama capacidad electrostática de un conductor aislado a la cantidad de carga eléctrica que contiene cuando está sometido a la influencia de un potencial eléctrico unitario.

La unidad de capacidad electrostática llamada "Farad" (en honor de los trabajos de investigación sobre dieléctricos efectuados por el físico inglés Michael Faraday) se define : " El Farad es la capacidad electrostática de una superficie tal, que bajo la influencia de una diferencia de potencial de un Volt, admita una carga eléctrica de un Coulomb".

Por ser esta unidad excesivamente grande para las necesidades prácticas, se utilizan normalmente la millonésima o la billonésima parte del farad es decir el microfarad (Mf) y el micromicro-farad (MMf) .

Si llamamos Q a la cantidad de electricidad o carga que toma un cuerpo bajo la acción de una diferencia de potencial de E volts, su capacidad electrostática estará dada por la expresión :

$$C(\text{farads}) = \frac{Q \text{ (coulombs)}}{E \text{ (volts)}}$$

o bien 
$$C = \frac{Q \times 10^6}{E} \text{ microfarads}$$

#### Influencia de un capacitor en un circuito de corriente alterna.

En la generalidad de las aplicaciones industriales, los condensadores son para vez empleados utilizando la propiedad que poseen de almacenar carga eléctrica (exceptuando quizás los condensadores utilizados en circuitos de control de interruptores para aumentar la corriente instantánea de disparo), más bien se aprovecha su propiedad de ejercer cierta influencia en los circuitos de corriente alterna, al modificar las características de reactancia de dicho circuito.

Vamos a estudiar brevemente en que consiste la influencia mencionada, tomando el caso ideal de un circuito cerrado de corriente alterna senoidal en el cual se intercala un condensador y dónde no existe resistencia óhmica al paso de la corriente, (Fig.14).

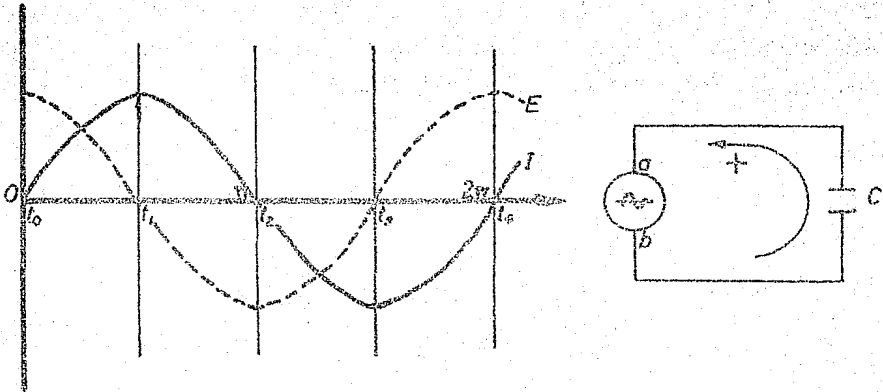


Fig. 14

En la Fig.14 podemos observar las variaciones de la fuerza electromotriz (E) durante un ciclo completo de cero a  $2\pi$ , o del instante cero al instante  $t_4$  y que siguen una forma senoidal pura.

En el instante  $t_0$ , la diferencia de potencial aplicada a las armaduras del condensador es máxima positiva y éste habrá quedado completamente cargado. Por lo tanto el circuito se encuentra en equilibrio eléctrico y la corriente (I) será nula.

Al pasar la F.E.M. del instante  $t_0$  al instante  $t_1$  irá decreciendo hasta hacerse nula, pero el condensador que se encuentra con su máxima carga y por lo tanto con una diferencia de potencial máxima entre sus armaduras, tenderá a descargarse para restablecer su equilibrio propio y hará fluir una corriente (I), tanto más intensa cuanto más rápida sea la variación de la F.E.M., quedando totalmente descargado.

Desde el instante  $t_1$  al instante  $t_2$ , la F.E.M. se va haciendo negativa, llegando a un valor máximo de sentido contrario al anterior. Como el condensador se encontraba descargado, tomará una corriente de carga de igual signo que el potencial pero que irá disminuyendo en valor absoluto a medida que la F.E.M. se acerque a su valor máximo negativo, puesto que la variación de dicha F.E.M. va siendo menos intensa. En el instante  $t_2$  la corriente de carga será nula nuevamente y el condensador quedará totalmente cargado pero con signo contrario al anterior.

Desde el instante  $t_2$  al instante  $t_3$ , la F.E.M. disminuye otra vez en valor absoluto y el condensador se vuelve a descargar en sentido opuesto al del período anterior de carga, aumentando la intensidad de la corriente negativa hasta el máximo a medida que la F.E.M. va disminuyendo hasta cero.

De  $t_3$  a  $t_4$ , la F.E.M. vuelve a aumentar pero ahora en sentido positivo. El condensador que habrá quedado descargado se cargará con una diferencia de potencial entre sus armaduras de igual signo que la F.E.M. La corriente irá disminuyendo a medida que las variaciones de potencial se vayan haciendo más lentas, hasta hacerse nula : repitiéndose el ciclo completo nuevamente.

Según el análisis anterior se comprende porque la corriente de un circuito conteniendo una capacitancia pura se adelanta a las variaciones de tensión en un cuarto de período o sea  $90^\circ$  eléctricos.

En realidad siempre existe resistencia en un circuito eléctrico y por lo tanto el adelanto de la corriente - debido al condensador no llegará exactamente hasta los 90 grados, dependiendo del valor de ésta resistencia.

En todo circuito inductivo la corriente se atrasa con respecto a la tensión y al introducir un condensador - se compensa totalmente o en parte éste atraso logrando así - que la corriente y el voltaje queden prácticamente en fase, - es decir con un factor de potencia tan cercano a la unidad - como sea posible.

Una vez explicada la operación del capacitor y - la influencia que ejerce en un circuito eléctrico, pasaremos a examinar los tipos de condensadores según su estructura interna y las partes que los integran.

#### Clases de condensadores estáticos.

Los condensadores estáticos o capacitores se pueden dividir en dos categorías principales, a saber : Condensadores con dieléctrico sólido, condensadores con dieléctrico líquido .

Los condensadores con dieléctrico sólido, o de - placas, se usan en general en todos los casos en que no se - exige gran capacidad como : circuitos electrónicos, instalaciones telegráficas y telefónicas, etc.

En este tipo de condensadores el problema de - las armaduras es completamente secundario. Solo se exige de ellas que no tengan mucha resistencia eléctrica, que sean - de un material maleable y de bajo precio y que sean capaces de laminarse muy delgadas. Los mejores elementos para estos fines son el estaño y el aluminio (en ciertos condensadores de laboratorio se ha llegado a emplear la plata).

En los condensadores de placas, como en los de rollo, lo que fija de una manera absoluta las características del mismo es el dieléctrico, porque a igualdad de superficie de armaduras y de distancia de separación entre las mismas, únicamente del dieléctrico empleado depende la magnitud de la carga que el condensador podrá tomar.

Los materiales preferentemente usados son : la mica, el vidrio y el papel, y, en menor extensión, se han usado también celuloide, acetocelulosa y hasta gelatina.

El dieléctrico debe ser de inmejorables características para compensar con su calidad la reducción de espesor de la cual depende directamente la capacidad de un condensador.

Lo que fija el espesor del dieléctrico es exclusivamente el voltaje a que debe estar sometido y que dependerá, para cada material de su rigidez dieléctrica. Esta rigidez dieléctrica o voltaje de ruptura depende a su vez de varios factores : de la temperatura externa e interna, de cambios químicos que modifican su estructura interna, de la humedad absorbida, de la naturaleza del medio ambiente, del tiempo de prueba, de la frecuencia y naturaleza del voltaje aplicado (alterno o continuo) etc.

Raros son los materiales en los cuales varía el voltaje de ruptura proporcionalmente con el espesor. Según Baur, éste voltaje ( $E_r$ ) depende de una constante propia del material ( $K$ ) y del espesor ( $l$ ) elevado a la potencia  $2/3$  :

$$E_r = K l^{2/3}$$

Hendricks descubrió que para un mismo espesor de material determinado, el voltaje de ruptura es mayor cuando existen varias láminas superpuestas que para una sola lámina. Esto es debido a que raras veces coinciden los puntos débiles de todas las láminas ya que ofrecen mayor resistencia mecánica y eléctrica que una lámina única.

La existencia de burbujas de aire en un dieléctrico también hace disminuir su rigidez dieléctrica, principalmente con altas tensiones porque al ionizarse aquél, se transforma el oxígeno en ozono (alotropía del oxígeno) que tiene un alto poder oxidante y destruye el dieléctrico, cambiando por lo tanto sus propiedades electrostáticas.

#### Condensadores con dieléctrico líquido.

El uso de aceites minerales como medio aislante o dieléctrico en condensadores, es relativamente antiguo en la industria puesto que data de más de cuarenta y cinco años. Estos aceites se usaban conjuntamente con papel de lino como elemento rígido separador entre las armaduras de estaño conductoras .

El uso de aceites aportaba varias ventajas con respecto a la parafina o los "compounds" con base de chapote y resinas; en primer lugar la de tener mayor constante dieléctrica, reduciéndose por lo tanto el volumen del condensador para una misma capacidad; en segundo lugar la eliminación de burbujas de aire, excesivamente nocivas, puesto que varían las condiciones de homogeneidad del dieléctrico al oxidarlo y al permitir también arcos internos. Además de esto, el aceite es un medio circulante que transporta el calor desarrollado en el interior del condensador hacia las paredes del tanque, refrigerando así a las armaduras y aumentando por lo tanto la capacidad térmica del aparato.

Sin embargo el gran auge de los capacitores industriales no comenzó antes de 1930 a 1932 con la elaboración y utilización en gran escala de los aceites sintéticos y del papel Kraft como medios dieléctricos. Estos aceites - como el Pyranol, el Askarel, el Elemex, producidos todos - por la Monsanto en los Estados Unidos, poseen una constante



dieléctrica elevada y son además inoxidables e ininflamables, permitiendo reducir todavía más que con los impregnantes minerales, el volumen del condensador a igualdad de capacidad. Esta reducción de volumen se debe también y en gran parte a las cualidades físicas y eléctricas del papel Kraft : su delgadez, su homogeneidad, su pureza y su gran rigidez dieléctrica.

La mayoría de los aceites minerales tienen una constante dieléctrica con respecto al aire de 2.5, es decir que pueden almacenar 2.5 veces más energía eléctrica que un mismo volumen de aire. Los aceites sintéticos poseen constantes dieléctricas que oscilan entre 3.5 y 5, lo cual permite reducir todavía más el volumen de los capacitores.

Veamos ahora en que consiste esta constante tan importante en la fabricación de condensadores.

#### Estudio teórico de los dieléctricos.

Todo dieléctrico está compuesto de moléculas y el comportamiento de una molécula en un campo eléctrico depende de su estructura interna. Las moléculas de muchos cuerpos tienen una estructura simétrica y, cuando uno de estos cuerpos se encuentra sometido a la influencia de un campo electrostático, la capa externa de electrones sufre un desplazamiento con respecto al núcleo cargado positivamente. A este fenómeno se le llama "Polarización electrónica".

Al ocurrir esta polarización, el cuerpo queda cargado eléctricamente, es decir que aparece una diferencia de potencial entre sus dos caras. Esta polarización se efectúa instantáneamente y también se puede invertir instantáneamente.

En otros cuerpos, las moléculas no son simétricas, entonces se denomina a su estructura "Polar". Cuando un material polar está sometido a un campo eléctrico aparece otro

tipo de polarización debida al giro de dipolos moleculares permanentes que tratan de orientarse o alinearse con las líneas de fuerza del campo.

Existe también otro tipo de desplazamiento llamado "Polarización atómica" que depende del movimiento relativo de los átomos cargados positivamente y negativamente en la molécula.

Además de esto, existen iones libres en el dieléctrico que emigran en un sentido u otro según la dirección del campo y se acumulan formando barreras hasta que la influencia del campo es suprimida o invertida. Esta polarización es conocida como "Polarización interfacial" o "Absorción dieléctrica" y depende, como lo hemos indicado, de la presencia de iones y de la estructura del material. El efecto de esta absorción se hace más notorio cuando la duración de aplicación del campo eléctrico es comparable con el tiempo requerido para producir esta emigración de iones. La polarización interfacial tiene el efecto contrario a las tres mencionadas anteriormente y tiende a nulificar la carga.

La llamada "Constante dieléctrica" es el resultado conjunto de estos cuatro tipos de polarización y en realidad no es una constante porque cada una de las polarizaciones depende a su vez de distintos fenómenos físicos.

Las polarizaciones atómica y electrónica son independientes de la frecuencia y dependen muy poco de la temperatura. La polarización dipolar sin embargo, varia con la frecuencia y fluidez de la substancia, pero es independiente de la tensión. La polarización interfacial o absorción dieléctrica depende grandemente de la frecuencia, de la temperatura, de la viscosidad y de la tensión eléctrica.

Aprofundicemos un poco más el problema de las polarizaciones por una parte y las características de todo dieléctrico, considerándolo también como aislador.

Se cree que la conductividad electrónica de los materiales aisladores o dieléctricos, en contraste con la de los metales, es insignificante salvo en campos eléctricos de un valor cercano al de la perforación. Pero tienen otras partículas conductoras - iones y moléculas de "momento eléctrico bipolar", como el ácido clorhídrico. La conductividad de estas partículas no alcanza nunca la magnitud de la conductividad electrónica de los metales, ya que son mucho mayores que los electrones y, por lo tanto, su movimiento está más restringido por las partículas circundantes.

El hecho de que los materiales dieléctricos tengan cierta conductividad, hace del estudio de esa propiedad un requisito de la mayor importancia, pues para que un condensador funcione bien de manera continua, es preciso que la conducción por el dieléctrico no sea excesiva.

#### Conducción iónica en un dieléctrico o aislador.

Los materiales aisladores o dieléctricos difieren mucho en cuanto a conductividad iónica, la cual depende del número de iones por centímetro cúbico del material, así como de la movilidad de estos iones. El cloruro de sodio (sal común) representa un extremo en que todos los átomos están ionizados. Los iones positivos del sodio y los iones negativos del cloro son resultado de la marcada afinidad electrónica del átomo de cloro, el cual extrae el electrón de valencia del átomo de sodio. Por otra parte, la sal cristalina seca es un excelente dieléctrico de muy poca conductividad eléctrica, ya que los átomos no pueden moverse en la apretada estructura regular de los cristales. Su poca conductividad proviene de las imperfecciones del cristal - vacíos en la celosía, causados por la ausencia de iones.

Los iones de sodio más pequeños pueden difundirse poco a poco por el cristal, saltando dentro de estos vacíos.

Cuando se aumenta la temperatura, la conductividad iónica aumenta también, por dos motivos : primero, a causa de la creciente tendencia de estos vacíos a multiplicarse en altas temperaturas; segundo, porque la movilidad de los iones se hace más marcada y estos adquieren con mayor frecuencia suficiente energía (por agitación térmica) para saltar a los vacíos contiguos. Este coeficiente térmico negativo de resistividad es característico de todos los dieléctricos, en contraste con los conductores eléctricos metálicos, cuyo coeficiente térmico de resistividad es positivo. Esto se debe a que la agitación térmica de los átomos impide el movimiento de los pequeños electrones conductores, los cuales se mueven más fácilmente entre los átomos cuando están más fríos y menos agitados.

Con pocas excepciones (el azufre y el diamante, entre otras) las materias aisladoras o dieléctricas inorgánicas en estado sólido son cristales o vidrios iónicos de estructura amorfa en que todos los átomos están ionizados pero restringidos de modo que sólo unos pocos se pueden mover. Los iones positivos más pequeños - de hidrógeno, sodio, potasio, etc. - se mueven más fácilmente y son los que más contribuyen a la conductividad cuando se hallan presentes.

Las materias orgánicas, en cambio, contienen relativamente menos iones, pues los átomos de sus moléculas están unidos por fuerzas sin corriente de conducción, en que los electrones se comparten en vez de ser enteramente transferidos de un átomo a otro. Los pocos iones existentes en los plásticos y los líquidos orgánicos ( como el Inerteen)

resultantes de la disociación de algunos compuestos iónicos son más móviles que en un cristal iónico, a causa de su estructura más floja y de la debilidad relativa de las fuerzas que los mantienen en la matriz que los rodea. Los iones existentes en los dieléctricos orgánicos son a menudo impurezas o productos de la oxidación u otro deterioro del dieléctrico. La conductividad iónica del dieléctrico varía, por lo tanto considerablemente, según la pureza o procedencia del material. Cuando éste la absorbe, el agua aumenta grandemente la conductividad iónica por asociación con los compuestos iónicos, los cuales se hacen más conductores. Por lo tanto, la proporción de agua en el dieléctrico, afectada por la humedad ambiente, influye mucho en la conductividad iónica. Otro factor que influye mucho en la conductividad iónica de estos materiales es la constante dieléctrica. Una materia de elevada constante dieléctrica constituye a la vez un disolvente más adecuado para los compuestos de impurezas iónicas y un medio más favorable para la disociación de esos compuestos.

#### Conducción bipolar de un dieléctrico.

Las moléculas bipolares ya mencionadas, conducen también durante cortos períodos de tiempo, por rotación en el sentido del campo eléctrico, pero esa conducción cesa cuando han girado en ese sentido tanto como su movimiento térmico casual lo permite. Por lo tanto, esas moléculas contribuyen a la conducción de la corriente continua durante un corto período solamente después de la aplicación del voltaje, y a la de la corriente alterna a las más altas frecuencias únicamente. El tiempo durante el cual ocurre la conducción bipolar varía naturalmente en razón inversa de la velocidad de rotación de la molécula, o en razón directa de la visco-

sidad, de modo que cuanto más viscoso es el material, más baja es la frecuencia a que la conducción bipolar empieza a ser apreciable.

Las moléculas orgánicas asimétricas como el etileno ( $CH_2$ )<sub>2</sub> o el polietileno tienen momentos eléctricos bipolares cuya magnitud varía según la índole de los átomos unidos en la molécula. Las moléculas asimétricas o bipolares tienen momentos eléctricos bipolares a causa de la diferencia de afinidad electrónica entre los átomos disimilares. Los elementos que tienen una corteza electrónica exterior casi completa, cuando se combinan con los que tienen una corteza exterior deficiente, tienden a arrancar electrones del átomo más deficiente, y un átomo de la molécula resultante se vuelve relativamente negativo, mientras que el otro se hace relativamente positivo.

#### Variación de la conductividad con el tiempo y la frecuencia:

El descenso de la corriente que se observa en las curvas de tiempo al probar los dieléctricos con un potencial de C.C. constituye un ejemplo de la variación de la conductividad en función del tiempo. Ese fenómeno puede ser causado por el movimiento limitado de los iones en el material y, como queda indicado, por la rotación de las moléculas bipolares a su límite. El movimiento de los iones puede ser limitado por la carga espacial establecida dentro del material por la formación de una capa de iones positivos cerca de la armadura negativa y de iones negativos a proximidad de la armadura positiva. Esa carga espacial crea un campo eléctrico en el sentido opuesto al del campo producido por el voltaje aplicado. Los efectos de ese mecanismo quedan limitados por una barrera de energía en las armaduras que impide la -

descarga de los iones que se acercan a ellas y que contrarresta la carga del condensador.

Otro mecanismo por medio del cual se puede limitar la migración de los iones es resultado de la heterogeneidad del material, es decir, de la existencia de caras intermedias entre diferentes sustancias de distinta conductividad. Uno de los ejemplos más patentes del caso, y que nos interesa muy particularmente, es el papel impregnado de aceite. Los iones pasan fácilmente a través del líquido en los poros, pero sólo lentamente o de ningún modo a través de las fibras del papel, en cuya superficie se hallan restringidos.

Este limitado movimiento de la carga en un dieléctrico es lo que se denomina "absorción dieléctrica", a causa de que la corriente que disminuye mientras se aplica el voltaje reaparece cuando se hace cesar el voltaje. Los iones emigran y las moléculas bipolares vuelven a girar hacia su posición casual primitiva, soltando al mismo tiempo la carga que contenían por atracción electrostática en las armaduras. Los mismos efectos se producen al aplicar el voltaje de corriente alterna en la proporción permitida por cada período de medio ciclo.

Se suele decir que la conducción de C.A., ( $g$ ) del aislamiento es la proporción entre la corriente de conducción (corriente de fase con el voltaje) y la corriente total (incluso la de carga o capacitancia cuyo desplazamiento de fase con el voltaje es de 90 grados). Esa proporción constituye el "factor de potencia" del dieléctrico o sea el coseno del ángulo de fase.

$$\text{factor de potencia} = \cos \theta = \frac{g}{(g^2 + \omega^2 c^2)^{1/2}} = \text{Sen } \delta'$$

La expresión "factor de disipación" significa la relación entre la conductividad y la frecuencia angular ( $\omega$ ) y la capacitancia ( $c$ ).

$$\text{factor de disipación} = \tan \delta = \frac{g}{\omega c}$$

en estas formulas  $\theta$  es el ángulo de fase,  $g$  es la conductividad,  $\omega$  es la frecuencia angular,  $c$  es la capacitancia y  $\delta$  el ángulo de pérdida (complemento a 90 grados del ángulo de fase).

Con una conductividad y una capacitancia constantes, el factor de disipación y la casi totalidad del factor de potencia disminuyen en razón inversa de la frecuencia. Esto se observa en los líquidos muy fluidos - tales como el Inerteen para condensadores - en que, salvo a altas frecuencias, la conductividad es más que todo de índole iónica. En los plásticos y los líquidos sumamente viscosos, en que el movimiento y la rotación bipolar son más lentos, la conductividad aumenta con la frecuencia a causa de la amplitud decreciente del movimiento, en que la migración de los iones o la rotación bipolar no alcanza su límite durante medio ciclo. Este efecto produce el máximo de factor de potencia o de disipación con la variación de la frecuencia o de la temperatura, ya que la viscosidad disminuye con esta última. El máximo ocurre más o menos cuando la viscosidad y el tiempo de medio ciclo coinciden de tal modo que el movimiento puede alcanzar su amplitud máxima en fase con el voltaje.

El factor de potencia aumenta con el voltaje en los dieléctricos porosos como el papel en que puede producirse un efecto de corona dentro de los vacíos internos, pero éste se elimina al impregnar con un líquido y puede observarse una reducción del factor de potencia a medida que aumenta el voltaje, ya que la amplitud del movimiento iónico en el líquido alcanza la extremidad de los poros en medio ciclo.



A medida que sube el voltaje, la velocidad de los iones aumenta y el tiempo requerido para alcanzar la barrera de los poros se acorta, de modo que los iones se vuelven conductores durante una fracción decreciente del ciclo. Esto es una gran ventaja, ya que contribuye a mantener un bajo factor de potencia a los altos voltajes de funcionamiento empleados en aparatos tales como los capacitores Inerteen.

Aplicaciones que exigen un bajo factor de potencia.

Aunque un bajo factor de potencia o una alta resistencia suelen considerarse como la medida de calidad del aislamiento, un factor de potencia moderado o una resistencia media resultan satisfactorios en muchos casos. El factor de potencia de un dieléctrico no debe ser alto y no debe alcanzar un valor peligroso que produzca un calentamiento excesivo o que indique la existencia de imperfecciones capaces de causar una falla.

La cantidad de calor por centímetro cúbico de dieléctrico producida por la conductividad de C.A. de éste es función del campo eléctrico, de la frecuencia y del factor de disipación. El calentamiento representa una pérdida de energía que, a bajas frecuencias, es parte insignificante de la energía total del aparato, pero cuando ese calor es excesivo, puede fundir o descomponer el dieléctrico y causar una falla. El calentamiento dieléctrico se hace excesivo cuando la caída de tensión, generalmente medida en volts por unidad de longitud, el factor de disipación o la frecuencia son demasiado altos. Ejemplo de esa situación es el caso de un capacitor de C.A. en que, a causa de la fuerte caída de tensión (300 a 400 volts por milésima de pulgada) se necesita un bajo factor de potencia. Otro detalle de los capacitores que requiere un bajo factor de potencia es su construc-

ción, a causa de la cual el calentamiento se produce en una sección espesa del aislamiento, cuya conductividad térmica es relativamente baja. Esto se traduce en un cambio o gradiente excesivo de temperatura entre el centro y la superficie, lo que evidentemente favorece la formación de puntos de calor extremo.

#### Polarización y constante dieléctrica del aislamiento.

Cuando los iones conductores o las moléculas bipolares ya mencionados pueden desplazarse con suficiente velocidad para llegar al límite de su movimiento en una pequeña fracción de ciclo, se produce una corriente que alcanza su valor máximo a voltaje nulo. Esto es desde luego, característico de las capacitancias y proporcional a la constante dieléctrica. Cuando los iones o las moléculas bipolares llegan al extremo de su movimiento, se dice que se han polarizado y se produce en el dieléctrico una caída del voltaje de polarización opuesta al voltaje aplicado. Los materiales que contienen gran cantidad de moléculas bipolares o de partes de moléculas capaces de girar a gran velocidad tienen una elevada constante dieléctrica. El aumento de constante dieléctrica es más o menos proporcional a la concentración de moléculas bipolares y al cuadrado de la magnitud de cada una de éstas. Las dos terceras partes de la constante dieléctrica de la celulosa (papel) con que se hace la mayoría de los capacitores se deben a bipolares rotativas del grupo de los oxhidrilos (OH), mientras que igual proporción de la constante dieléctrica del capacitor Inerteen se debe a sus moléculas rotativas (difencil clorado).

### Perforación dieléctrica.

Una de las principales fallas que puede sufrir un dieléctrico es la perforación por los voltajes normales o de prueba que se le aplican. Esa falla suele ser resultado de una avalancha de electrones en el dieléctrico y en algunos casos, se debe al calentamiento excesivo producido por una alta conductividad bajo la influencia de un campo eléctrico que descompone el carbono conductor (en el caso de los dieléctricos orgánicos como son los aceites minerales).

Cada avalancha es resultado de la aceleración de un electrón inicial por el campo eléctrico, el cual produce, al chocar con átomos o moléculas, electrones secundarios, que, de la misma manera, producen otros electrones, hasta que estos sean suficientes para volver conductor al dieléctrico aislador.

La resistencia dieléctrica de una sustancia homogénea depende de la resistencia u oposición a la aceleración de los electrones que a su vez depende de la densidad de dicha sustancia, a causa de la mayor posibilidad de colisiones que reduzcan la velocidad de los electrones, así como de la capacidad de atracción de electrones de los átomos, moléculas o estructura de la sustancia mencionada.

La Tabla IX muestra la resistencia dieléctrica intrínseca observada en diferentes materiales a la temperatura de 25°C.

TABLA IX

RESISTENCIA DIELECTRICA INTRINSECA

<u>Materia</u>	<u>Volts por Mil</u>
Aire a 1 atm.	79
papel de lino impregnado	200
papel de lino puro	275
papel Kraft impregnado	320
papel Kraft puro	400
papel celofan	1295
Cloruro de Sodio Cristalino	3800
Aceite Mineral	5000
Polietileno	16500
Mica, perpendicular a las láminas	24500

El mil equivale a una milésima de pulgada  
39.37 mils = 1 mm.

Los valores indicados en la tabla anterior son mucho más altos que los obtenidos en pruebas comerciales o prácticas por varias razones : (1) la existencia de defectos, agujeros, partículas conductoras y extrañas en el dieléctrico comercial;(2) la presencia de una concentración de tensiones en las orillas de las armaduras, en que puede iniciarse la falla, por el hecho de que el campo eléctrico es mucho más intenso que lo normal;(3) el efecto dañino causado por la descarga eléctrica durante las pruebas con corriente alterna;(4) el calentamiento dieléctrico que hace subir la temperatura y reduce la resistencia a la perforación al aumentar la agitación electrónica.

La relación entre la fuerza de los campos eléctricos en los diferentes materiales aisladores varía en razón

inversa de la relación entre sus constantes dieléctricas. Esto impone una tensión eléctrica más alta al elemento de constante dieléctrica más baja del dieléctrico compuesto, cuya resistencia dieléctrica baja será causa de que se perfora a menor voltaje. Esto suela de por sí reducir la resistencia dieléctrica total del elemento compuesto, pues cuando ocurre una perforación parcial en un punto, la tensión aumenta en el resto.

Podríamos decir también que los elementos de constante dieléctrica más baja, dentro de un campo electrostático constante, están sometidos a un esfuerzo de perforación mayor. Por lo tanto, en todo dieléctrico compuesto, como el papel de lino impregnado con aceite mineral, al disminuir la constante dieléctrica global con respecto a la del aceite -que suele ser alta-, el papel deberá resistir mayores tensiones eléctricas que las que le corresponden nominalmente. Esto se podrá solucionar aumentando el número de capas de papel.

Podemos establecer una relación ligando entre sí las características de los dieléctricos (espesor "d" o volumen del dieléctrico, constante dieléctrica "k" y resistencia dieléctrica o esfuerzo de ruptura en V/mil) :

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{K_2}{K_1} \left( \frac{V_1/\text{mil}}{V_2/\text{mil}} \right)^2 = \frac{\text{cm}_1^3}{\text{cm}_2^3}$$

De esta relación se concluye que, contra menor sea la constante dieléctrica, mayor deberá ser el espesor del material para resistir al esfuerzo de ruptura. Esto nos hace comprender porqué es necesario evitar lo más posible la heterogeneidad del material, principalmente la inclusión de burbujas de aire que disminuyen la constante dieléctrica global y por lo tanto disminuyen también la resistencia a la ruptura.

Es necesario también evitar la aparición de humedad en el líquido dieléctrico puesto que ésta aumenta la

conductividad iónica al descomponer el material y, como hemos visto, la formación de iones es nociva ya que tienden a formar barreras de potencial que anulan el efecto de carga de un condensador.

En conclusión, obtendremos un dieléctrico de inmejorables cualidades al combinar el papel de lino o el papel Kraft con algún aceite orgánico o sintético. El papel tendrá funciones de separador mecánico entre las armaduras metálicas; dejará circular el aceite, restringirá la circulación de iones, o sea que tendrá gran rigidez dieléctrica y además una buena constante dieléctrica (puesto que la celulosa contiene gran cantidad de dipolos moleculares).

El aceite orgánico (vegetal o mineral) tendrá una buena constante dieléctrica -de 2 a 5 generalmente- no deberá contener impurezas o productos de la oxidación ni humedad (que aumente la conductividad iónica); no deberá ser muy viscoso para permitir una buena conducción bipolar; deberá tener un factor de potencia reducido (lo que se traduce por una corriente de conducción iónica pequeña) y al impregnar el papel hará disminuir el factor de potencia ( $\cos \theta$ ) de este último, disminuyendo en consecuencia el factor de disipación ( $\tan \delta$ ) y por lo tanto la "Cantidad de calor" ( $q$ ) producida por la conductividad iónica en el dieléctrico y que está dada por la ecuación :

$$q = \frac{5}{9} \times \epsilon' \tan \delta \times f E^2 \times 10^{-12} \quad (\text{watts/cm}^3)$$

en la cual :

$E$ , es el campo en volts/cm

$f$ , la frecuencia

$\epsilon'$ , la constante dieléctrica relativa

$\tan. \delta$ , el factor de disipación

En definitiva, el aceite es un excelente medio refrigerante, principalmente si es bastante fluido, puesto

que transporta el calor del centro del dieléctrico hacia la superficie interna del tanque.

La mayoría de los aceites sintéticos (compuestos aromáticos de hidrocarburos clorurados) tienen una constante dieléctrica que varía entre 3 y 5 ; no tienen afinidad con el agua y por lo tanto son inoxidables; no permiten la formación de la llamada "cera X" que es un compuesto de hidrógeno e hidrocarburos de bajo peso molecular, producto de la ionización de burbujas gaseosas originadas por los altos voltajes de prueba; en definitiva, estos aceites no son inflamables. Por todas estas razones los aceites sintéticos aportan ventajas considerables con respecto a los aceites minerales.

Veamos algunas de las características principales de un aceite mineral para transformadores (Penex #1) y de un aceite sintético (Inerteen : pentacloro-difenilo).

	Penex #1.	Inerteen
Densidad, 25° C	0.88	1.54
Punto de congelación	-40° C	-32° C
Viscosidad-Seg. Saybolt 100°F	60	54
Punto de flameo (Flash)	130°C	ninguno
Punto de ignición (Fire)	150°C	ninguno
Factor de disipación, 25°C	0.0004	0.0005
Rigidez dieléctrica	25 KV	45 KV
Constante dieléctrica, 25°C	2.2	4.95
Factor de pérdida	0.00088	0.002475

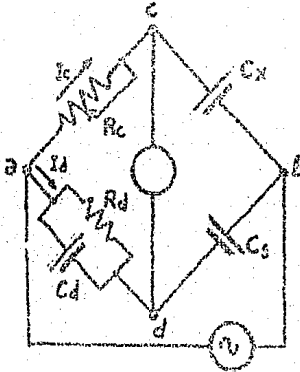
Terminaremos este breve estudio sobre dieléctricos explicando el proceso a seguir para medir sus pérdidas internas.

#### Medición de las pérdidas dieléctricas con el puente de Schering.

El puente de Schering es un puente de impedancias capacitivas, semejante al puente de Wheatstone para -

corriente directa, sólo que opera con un potencial alterno de frecuencia (f) inferior a los 2000 cps.

Este puente deberá formarse con resistencias y condensadores patrón fijos y variables y con un galvanómetro de precisión, según se muestra en el diagrama de la Fig.15:



$$\omega = 2\pi f$$

Fig.15

$R_c$  y  $R_d$  son resistencias patrón, una fija y otra variable  $C_d$  y  $C_c$  son capacitancias patrón, una fija y otra variable  $C_x$  es la capacitancia incógnita.

Las impedancias en cada uno de los brazos serán :

$$Z_c = R_c \qquad Z_d = \frac{1}{\frac{1}{R_d} + j\omega C_d}$$

$$Z_x = R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \qquad Z_s = \frac{1}{j\omega C_s}$$

Si ajustamos  $R_c, R_d, C_d$  y  $C_s$  de tal manera que no exista diferencia de potencial entre los puntos (c) y (d) entonces podremos escribir las ecuaciones generales de equilibrio :

$$I_c Z_c = I_d Z_d \qquad \text{y} \qquad I_c Z_x = I_d Z_s$$

Dividiendo la última entre la primera obtendremos :

$$Z_x Z_d = Z_c Z_s$$



Ahora si reemplazamos las impedancias por sus parámetros :

$$\left( R_x + \frac{1}{j \omega C_x} \right) \left( \frac{1}{\frac{1}{R_d} + j \omega C_d} \right) = R_c \left( \frac{1}{j \omega C_s} \right)$$

despejando el factor que contiene las incógnitas y desarrollando el segundo miembro :

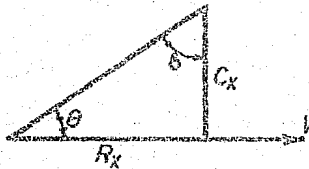
$$R_x - j \frac{1}{\omega C_x} = R_c \frac{C_d}{C_s} - j \frac{R_c}{\omega C_s R_d}$$

igualando los términos reales e imaginarios de los complejos obtenemos :

$$R_x = R_c \frac{C_d}{C_s}$$

$$\frac{1}{C_x} = \frac{R_c}{C_s R_d} \quad \text{o bien} \quad C_x = C_s \frac{R_d}{R_c}$$

Con lo cual podemos obtener, con toda precisión, el valor de la capacitancia en prueba ( $C_x$ ), además de su resistencia interna  $R_x$  y su reactancia capacitiva  $X_c = \frac{1}{\omega C_x}$



$$\theta + \delta = 90^\circ$$

El ángulo de pérdida dieléctrica " $\delta$ " es, según estipulamos anteriormente, el ángulo cuya tangente es  $\frac{R_x}{X_c} = \omega C_x R_x$

$$\begin{aligned} \delta &= \text{arc. tan. } \omega C_x R_x \\ &= \text{arc. tan. } \omega C_d R_d \end{aligned}$$

El factor de potencia del dieléctrico " $\text{Cos } \theta$ " será :

$$\text{Cos } \theta = \text{Sen } \delta$$

y para ángulos muy pequeños :

$$\text{Sen } \delta \approx \text{tan. } \delta = \omega C_d R_d$$

El factor de pérdida de un dieléctrico es también uno de los elementos que determinan la calidad de un material. Este factor de pérdida "Kp" es igual al producto del factor de potencia por la constante dieléctrica :

$$\text{Factor de pérdida dieléctrica} = K_p = K \cos \theta$$

Contra menor sea el factor de pérdida mejor será el dieléctrico utilizado, pues significa que no desarrollará un calor excesivo durante la operación, (en otras palabras significa que contiene muchas moléculas bipolares y pocas iones).

El aceite de ricino como impregnante (Castor oil).

Se ha estudiado la posibilidad de utilizar el aceite de ricino del país como impregnante para el papel de lino comercial en la fabricación de capacitores industriales. Sin embargo, una experimentación completa no ha sido llevada a cabo todavía, principalmente refinando el aceite para fines eléctricos, o efectuando la impregnación de capacitores en cámaras de alto vacío calentadas a una temperatura determinada para evitar la humedad y la formación de burbujas de aire.

En las condiciones actuales, el aceite de ricino puro que se encuentra en el mercado, tiene algunas características físicas que lo hacen bastante apto para usarlo como impregnante:

Densidad, 25°C	0.96
Punto de congelación	-10°C
Viscosidad-Seg. Saybolt 100°F	200
Punto de flameo (Flash)	260°C
Factor de disipación 25°C	0.0018
Rigidez dieléctrica	18.7 KV
Constante dieléctrica, 25°C	3.25 a 4.7
Factor de pérdida	0.00846

Como vemos en la tabla anterior, el aceite de ricino tiene una constante dieléctrica bastante alta, comparada con la del aceite de transformador (Pemex) mencionado anteriormente. El papel de lino comercial impregnado con aceite de ricino señala una constante dieléctrica de 2.73 y con aceite de transformador 1.93 .

Estas cifras nos indican que el aceite de ricino impregna menos el papel que el del transformador. Comparemos las constante del aceite solo y de la combinación con papel :

Porciento de impregnación a presión y temperatura normales:

-para el aceite de transformador	$\frac{1.93}{2.2}$	100 =	87.7%
-para el aceite de ricino	$\frac{2.73}{3.25}$	100 =	84 %

Sin embargo con un aceite de ricino más puro e impregnado al vacío, posiblemente podríamos obtener una impregnación más eficiente pues a la presión y temperatura normales el aceite de ricino es mucho más viscoso que el de transformador. También se podría disminuir, en estas condiciones, el factor de pérdida que es más alto en el aceite de ricino (0.00846 contra 0.00088 para el de transformador).

El aceite de ricino se caracteriza por el hecho de no ser miscible con otros aceites que pudieran mejorar sus cualidades (sólo se disuelve en alcohol absoluto y éter de petróleo, substancias peligrosas al punto de vista eléctrico). Sin embargo, sometiendo aceite de ricino durante unas doce horas a una temperatura de 260° a 300°C y a 4 a 6 atmósferas de presión, se vuelve miscible con los aceites y compuestos minerales. Esto nos permitiría quizás mezclarlo con inhibidores aromáticos que aumentarían su punto de inflamación y evitarían la formación de oclusiones gaseosas así como con otros compuestos de aceites minerales que aumentarían su rigidez dieléctrica.

A la intemperie, el aceite de ricino tiene la desventaja de su tendencia a la formación de ácidos grasos, en consecuencia los tanques de capacitores con este aceite tendrán que ser perfectamente herméticos.

Sin embargo tiene la ventaja de no ser en absoluto higroscópico - al revés del aceite de transformador que sí lo es - y por lo tanto no se descompone con la humedad (que da lugar a la formación de iones).

A reserva de experimentar con algún otro tipo de aceite impregnante o de importar aceites sintéticos de los Estados Unidos, los diseños de capacitores que proponemos a continuación en este estudio se harán sobre la base de utilizar aceite de ricino industrial del país como impregnante.

#### Capacidad de un condensador plano.

Según la definición de capacidad dada al comienzo de este capítulo se dedujo la relación siguiente :

$$C \text{ (farads)} = \frac{Q \text{ (coulombs)}}{V \text{ (volts)}}$$

o bien

$$C = \frac{Q}{V} \frac{10^6}{300} \mu f$$

Si Q está en Stat-coulombs y V en Stat-volts, C estará dado en Stat-farads. La relación entre los dos tipos de unidades será :

$$C \text{ farads} = \frac{Q \times 3 \times 10^9}{V \times 1} = C \text{ stat-farads} \times 9 \times 10^{11}$$

$$1 \text{ Farad} = 9 \times 10^{11} \text{ St-farads}$$

$$1 \mu \text{ farad} = 9 \times 10^5 \text{ St-farads}$$

Veamos ahora como podemos deducir la ecuación de la capacidad de un condensador plano en función de sus características físicas.

En todo condensador se produce un flujo electrostático  $\Psi = 4\pi Q$  siendo  $4\pi$  el factor del sistema C.G.S. racionalizado y "Q" la cantidad de electricidad admitida en Stat-coulombs.

Si "A" es la superficie del dieléctrico, la densidad del campo resultará igual a :

$$D = \frac{4\pi Q}{A} \quad \text{y la intensidad del campo en el dieléctrico será :} \quad E = \frac{D}{K} = \frac{4\pi Q}{AK}$$

dónde "K" es la "Capacidad inductiva específica" o "Constante dieléctrica" .

Siendo iguales la intensidad de campo (E) y el gradiente de potencial, la diferencia de potencial entre armaduras (V) será igual a la intensidad por el espesor del dieléctrico (T):

$$V = E \quad E = \frac{4\pi Q T}{AK} \quad \text{stat-volts}$$

De dónde la capacitancia estará dada por :

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{AKQ}{4\pi Q T} = \frac{AK}{4\pi T} \quad \text{stat-farads}$$

y en microfarads obtendremos :

$$C = \frac{AK}{4\pi T} \cdot \frac{1}{9 \times 10^5} = \frac{1}{36\pi} \cdot \frac{AK}{T} \times 10^{-5}$$

$$C = 0.00885 \times 10^{-5} \quad K \frac{A}{T} \quad \mu\text{-farads}$$

dónde A está en  $\text{cm}^2$  y T en cm.

En los condensadores de rollo, habrá que agregar un factor 2 puesto que cada armadura trabaja por ambas caras a la vez.

En los condensadores pequeños, para circuitos electrónicos, la capacidad se multiplica por un factor un poco menor de dos porque aparece un fenómeno de inducción debido a que las terminales casi siempre se sacan por un extremo de las armaduras metálicas.

En los condensadores industriales se evita este defecto sacando la conexión a la mitad de la longitud de las armaduras por medio de una tirilla del mismo material, con lo cual se logra que la corriente de carga se divida y distribuya en dos sentidos opuestos, neutralizándose así el efecto inductivo. Si la corriente de carga es muy elevada para una sola tirilla, entonces se ponen las que sean necesarias, pero siempre de dos en dos equidistantes del centro de cada armadura.

Según esto, la capacitancia de un condensador de rollo estará dada por :

$$C = 2 \times 0.0885 \times 10^{-6} K \frac{A}{T} \text{ microfarads}$$

A = Área de una armadura en cm<sup>2</sup>.

T = espesor del dieléctrico en cm.

K = constante dieléctrica del papel impregnado.

o o o

#### CALCULOS PRELIMINARES DE LOS CAPACITORES

Como hemos visto anteriormente, los capacitores se clasifican en la práctica por sus KVA reactivos, así como por la tensión normal de trabajo y la frecuencia en ciclos por segundo, de dicha tensión. Sin embargo la capacidad de un condensador se mide en farads o microfarads que son los que determinan directamente sus propiedades físicas.

Vamos a continuación las relaciones que ligan los KVAR con la capacidad en microfarads.

Siendo la corriente de carga

$$I_c = 2 \pi f C E \times 10^{-6} \text{ amperes}$$

multiplicando ambos miembros por la tensión E obtenemos en el primer miembro volt-amperes reactivos y dividiendo por 1000 :

$$\text{KVAR} = 2 \pi f C E^2 \times 10^{-9}$$

Por medio de esta ecuación podemos obtener los micro-farads por KVAR para determinada tensión en volts y frecuencia en cps.

$$C = \frac{1000}{2\pi f E^2} (10^6) \mu \text{ farads}$$

En particular podemos establecer la tabla X :

Volts	$\mu\text{f/KVAR}$	
	60 cps	50 cps
230	50.148	60.202
460	12.537	15.050

La reactancia en Delta por fase de un capacitor será igual a :

$$X_c = \frac{10^6}{2\pi f C} \text{ ohms}$$

La reactancia Estrella equivalente será igual a un tercio de la anterior.

Los rollos que constituyen el capacitor deberán conectarse en paralelo para que la suma de capacidades de cada uno de ellos nos dé la capacidad total, puesto que :

$$C_t = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Estudiemos ahora más en particular la constitución de los capacitores monofásicos.

Supongamos los rollos perfectamente comprimidos y acomodados según la figura 16.

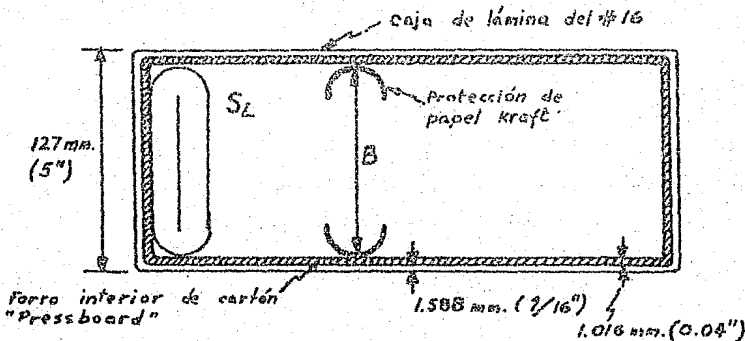


Fig. 16

La ASA y la NEMA recomiendan como medidas prácticas para tanques de capacitores monofásicos :

4 a 5 pg. de ancho

15 pg. de largo

12 a 14 pg. de alto y

8 a  $9\frac{1}{2}$  pg. de ancho por armadura

$8\frac{3}{4}$  a  $10\frac{1}{4}$  de ancho por hoja de papel Kraft.

Tomando como base el ancho estándar del tanque, de 127 mm (5 pg.) y la superficie de asiento de cada rollo ( $S_L$ ) igual en los dos tipos de capacitores propuestos, para evitar problemas posteriores de construcción, establecí que se necesitarían 12 rollos para el capacitor de 2.5 KVA y 10 rollos para el capacitor de 5 KVA.

Por otra parte podemos establecer las relaciones propias a cada rollo en función de las características geométricas de los materiales utilizados basándonos en la figura 17.

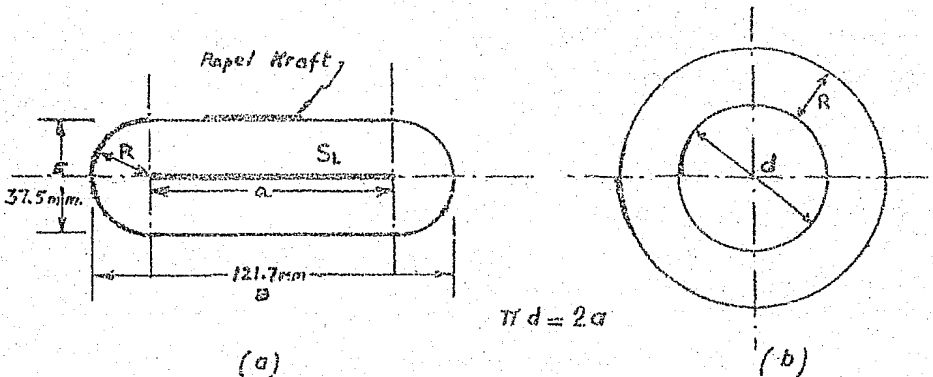


Fig.17

$S_L$  = Superficie de asiento del rollo.

B = Longitud máxima de la base del rollo.

E = Ancho del rollo comprimido y forrado.

R = Espesor del rollo.



- t = Espesor de cada capa (aluminio y papel)
- 2a = perímetro interior del rollo.
- N = Número de capas o vueltas por rollo.
- L = Longitud total de una armadura.

$$S_L = t L \quad R = N t \quad B = a + 2 R$$

La superficie de asiento es también igual a :

$$\begin{aligned} S_L &= \pi R^2 + a 2R \\ &= \pi R^2 + 2 (B-2R) R \\ &= (\pi - 4) R^2 + 2BR = tL \end{aligned}$$

$$tL = (\pi - 4) N^2 t^2 + 2BNt$$

Esta es una ecuación de segundo grado :

$$\begin{aligned} (4 - \pi)t N^2 - 2BN + L &= 0 \\ (0.8584 t) N^2 - (2B)N + L &= 0 \end{aligned}$$

y las raíces serán :

$$N = \frac{B \pm \sqrt{B^2 - 0.8584 tL}}{0.8584 t}$$

Por medio de la ecuación anterior podemos encontrar el número de vueltas de cada rollo en función del espesor de cada capa (t), de la longitud total de la hoja de aluminio (L) y de la longitud máxima de la base del rollo (B).

Con el fin de evitar el mayor número de variaciones en la construcción, propongo de antemano utilizar un mismo tanque, así como el mismo ancho para las hojas de aluminio y las de papel Kraft, en los dos tipos de capacitores propuestos. Estas dimensiones serán :

- Ancho del tanque ..... 127 mm ( 5 pg.)
- Altura del tanque (según calculos posteriores) .... 323.85 mm (12 3/4 pg.)
- Longitud del tanque (según calculos posteriores) ..... 457 mm ( 18 pg.)

Ancho del aluminio ..... 240 mm ( $9^{15}/32$  pg.)

Ancho del papel dieléctrico .... 260 mm ( $10^{15}/64$  pg.)

Materiales :

El tanque se hará con lamina de acero del #16, fácil de trabajar y cuyo espesor es de 1.588 mm ( $1/16$  pg.). El conjunto de rollos se envolverá en un paquete formado por 4 capas de carton "Pressboard" de 10 milésimas de pulgada de espesor, para proteger mecánica y eléctricamente a los rollos. El espesor total del forro será de 1.016 mm (0.04 pg.)

Por lo que respecta al papel "Kraft", de excelentes cualidades dieléctricas, la fábrica de Papel de San-Rafael Atlixco (Puebla) ha asegurado poder fabricarlo con un espesor de 0.0127 mm (0.0005 pg.), pero no garantiza la carencia absoluta de impurezas (partículas metálicas principalmente). Por esta razón se usará de 3 a 4 capas de papel para disminuir la probabilidad de que los puntos de falla o las porosidades coincidan.

La lámina de aluminio más apropiada para capacitores debe tener un espesor de 0.0127 mm (0.0005 pg.) y ser químicamente pura.

Cada rollo estará protegido por 4 capas adicionales de papel Kraft según se vé en las Fig. 16 y 17, con un espesor total de 0.0508 mm (0.002 pg.).

La longitud B será igual entonces al ancho del tanque menos las paredes del tanque, el cartón y el forro individual de Kraft.

$$B = 127 - 2 (1.558 + 1.016 + 0.0508)$$

$$B = 121.7 \text{ mm}$$

Espesor del dieléctrico.

Para 2.5 KVAR, 230 volts pondremos 3 hojas de papel (suponiendo que falle una, quedan 2 hojas  $\times$  0.5 mils = 1 mil efectivo y el esfuerzo a la tensión será de  $230/1 = 230$  Volts por mil), luego  $T_1 = 0.0381$  mm

El espesor de una capa completa constituida por 2 hojas de aluminio y 6 hojas de papel será :

$$t_1 = 0.1016 \text{ mm}$$

Para 5 KVAR, 460 Volts pondremos 4 hojas de papel (si falla una, quedarán 3 hojas  $\times 0.5 = 1.5$  mils y el esfuerzo a la tensión será de  $460/1.5 = 306$  Volts por mil, perfectamente aceptable):

$$\text{luego } T_2 = 0.0508 \text{ mm}$$

El espesor de una capa completa con 2 hojas de aluminio y 8 hojas de papel será :

$$t_2 = 0.127 \text{ mm}$$

El aceite impregnante que se utilizará en estos diseños es el aceite de ricino industrial cuyas características fueron -- mencionadas anteriormente. Para fines de diseño preliminar -- supondremos que su constante dieléctrica K es igual a 3 (va-- lor bastante próximo a la realidad puesto que el aceite puro de ricino varía entre 3.25 y 4.7)

Diseño del capacitor de 2.5 KVAR, 230 volts, 50 cps.

Según los valores de  $\mu\text{f/KVAR}$  de la tabla X, el -- capacitor de 2.5 KVAR tendrá :

$$60.202 \times 2.5 = 150.5 \mu\text{f}$$

Agregando 7.6 % de tolerancia por variaciones en la manufac-- tura, obtenemos una capacidad total de diseño de :

$$150.5 \times 1.076 = \underline{162 \mu\text{f}}$$

La capacidad por rollo al colocar 12 rollos en paralelo será:

$$162/12 = 13.5 \mu\text{f}$$

La superficie de cada armadura según la ecuación de los con-- densadores de rollo estará dada por :

$$A_1 = \frac{C_1 T_1 10^6}{2 \times 0.0855 K} \text{ cm}^2$$

$$C_1 = 13.5 \mu\text{f}$$

$$T_1 = 0.00381 \text{ cm}$$

$$K = 3$$

$$A_1 = \underline{100.263 \text{ cm}^2}$$

Habiendo escogido el ancho de la hoja de aluminio como 24 cm ( $9^{15}/32$  pg.), podremos calcular ahora la longitud total de cada armadura.

$$L_1 = \frac{100.263}{24} = 4177.625 \text{ cm}$$

$$L_1 = \underline{41776.25 \text{ mm}}$$

La superficie de asiento del rollo será :

$$S_{L_1} = t_1 L_1 = 0.1016 \times 41776.25 = 4244.467 \text{ mm}^2$$

Podremos obtener ahora el número de capas o vueltas por rollo (N) por medio de la ecuación establecida anteriormente, reemplazando por sus valores a las constantes B y  $t_1$  :

$$N_1 = \frac{121.7 - \sqrt{14.811 - 0.0872 L_1}}{0.0872} = \frac{121.7 - 105.7}{0.0872}$$

$$N_1 = \underline{184 \text{ vueltas por rollo}}$$

(La raíz positiva de 2610 vueltas da rollos más anchos que largos que tendrían que ser alojados en un tanque de longitud disproporcionada).

El espesor del rollo será :  $R = N_1 t_1$

$$R = 184 \times 0.1016 = 18.7 \text{ mm}$$

El ancho del rollo comprimido y forrado será igual a :

$$E = 2 (18.7 + 0.0508)$$

$$E = 37.5 \text{ mm} \cong 1.5 \text{ pg.}$$

A partir de este dato podremos calcular la longitud exterior del tanque que alojará 12 rollos (tomando en cuenta el espesor del forro de carton y del tanque) .

Longitud externa del tanque :

$$12 \times 37.5 + 2 (1.016 + 1.588) = 455.8 \text{ mm}$$

dejando una ligera holgadura obtenemos :

$$\underline{457 \text{ mm}} \text{ (18 pg.)}$$

Diseño del capacitor de 5 KVAR, 460 Volts, 50 cps.

Siguiendo el mismo proceso del diseño de 2.5 KVAR obtendremos los resultados siguientes :

De la Tabla X obtenemos :

$$15.05 \times 5 = 75.25 \mu f$$

Agregando también 7.6 % de tolerancia

$$75.25 \times 1.076 = \underline{81 \mu f}$$

La capacidad por rollo ~~se~~ colocar 10 rollos en paralelo será de :

$$81/10 = 8.1 \mu f$$

La superficie de la armadura  $A_2$  calculada con los valores

$C_2 = 8.1 \mu f, T_2 = 0.00508$  y  $K = 3$  será igual a :

$$A_2 = \underline{80,210.4 \text{ cm}^2}$$

El ancho de la hoja siendo igual que en el primer diseño o sea 24 cm, obtenemos una longitud de :

$$L_2 = \frac{80,210.4}{240} = 33,421 \text{ mm}$$

La superficie de asiento de este rollo deberá ser igual a la del diseño de 2.5 KVAR, como se estableció al determinar las ecuaciones precedentes. Efectivamente esta superficie dá :

$$\begin{aligned} S_{L2} &= t_2 L_2 = 0.127 \times 33,421 \\ &= 4244.467 \text{ mm}^2 = S_{L1} \end{aligned}$$

El número de vueltas será ahora de :

$$N_2 = \frac{121.7 - \sqrt{14810.89 - 0.11 L_2}}{0.11} = \frac{121.7 - 105.7}{0.11}$$

$$N_2 = \underline{147 \text{ vueltas por rollo}}$$

El espesor del rollo R y su ancho E también serán iguales - que en el primer caso, a saber :

$$R = N_2 t_2 = 147 \times 0.127 = 18.7 \text{ mm}$$

$$E = 37.5 \text{ mm}$$

Ahora bien, para llenar el tanque tendremos que poner en ambos extremos del paquete de 10 rollos unos espaciadores de 37.5 mm (1.5 pg.) de grueso para reemplazar los 2 rollos faltantes con respecto al primer diseño. Estos espaciadores se pueden hacer con carton "pressboard" de 6.35 mm (1/4 pg.) de grueso, cortado y pegado con un cemento a base de fécula de papa en la forma mostrada en la Fig. 18.

Por arriba y por debajo podrá circular libremente el aceite, aumentando así el enfriamiento.

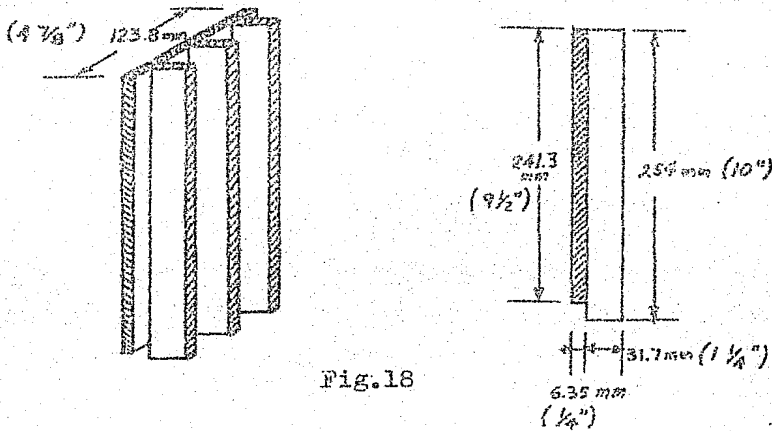
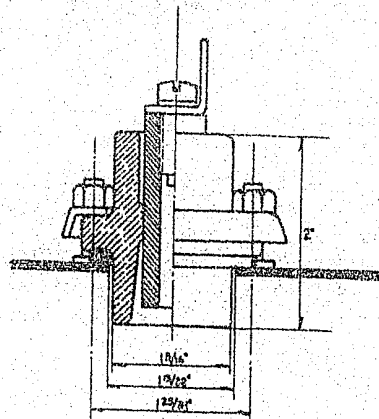
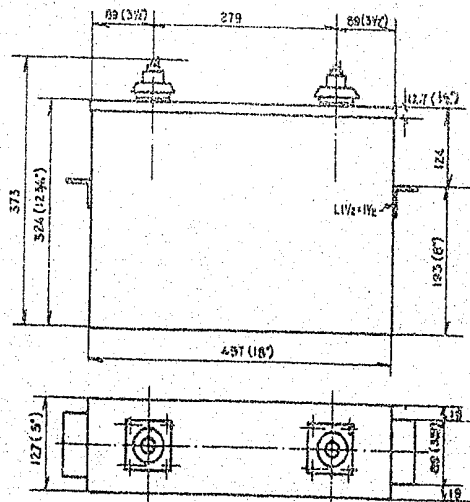


Fig. 18

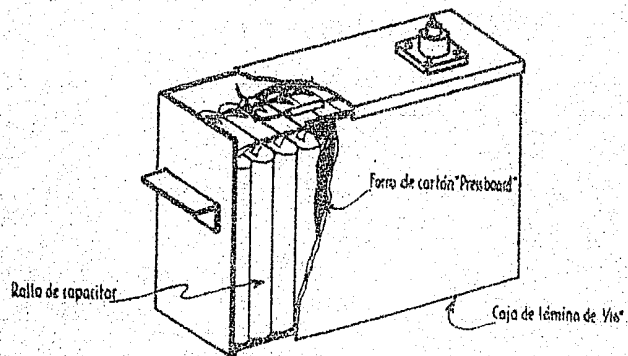
Altura del tanque.

La altura del tanque queda determinada por la altura de los rollos que es de 260 mm (ancho del papel Kraft), más el espesor del aislamiento y de las láminas superior e inferior, más 12.70 mm (1/2 pg.) que sobresale la cubierta lateral, más un espacio libre superior de 47 mm para colocar la resistencia de descarga y hacer las conexiones a los bushings terminales.

La altura exterior del tanque será por lo tanto de : 323.85 mm (12 3/4 pg.).



**DETALLE DEL BUSHING**



Acot. en mm.

**ENI**

ARREGLO GENERAL DEL  
CAPACITOR DE 2.5 KVAR.

**FIG. 19**

El arreglo general y las dimensiones del capacitor de 2.5 KVA se muestran en la figura 19. Incluímos las orejas de suspensión que se harán con lámina de 3.175 mm (1/8 pg.) de espesor así como los aisladores de paso o "bushings" de fabricación nacional. El capacitor de 5 KVA tendrá las mismas dimensiones exteriores y su arreglo será similar al anterior excepto que incluirá los 2 espaciadores mencionados anteriormente.

CORRIENTES NOEMALES DE CARGA Y LAMINILLAS DE CONEXION.

$$I = 2 \pi f CE \times 10^{-6} \text{ amp.}$$

Para un rollo del capacitor de 2.5 KVA tendremos :

$$I_1 = 6.28 \times 50 \times 13.5 \times 230 \times 10^{-6} \\ = 0.976 \text{ amp.}$$

Resistividad del aluminio  $\rho = 16.323 \times 10^{-6}$  ohms/pg<sup>2</sup>/ft

Si hacemos las tirillas de conexión de una pulgada de ancho (25.4 mm) y 0.0005 pg. de espesor tendrán una sección de:

$$S = 1 \times 0.0005 = 0.0005 \text{ pg}^2$$

Ahora tomándolas de 1 pie de longitud obtendremos una resistencia de :

$$16.323 \times 10^{-6} / 0.0005 = 0.0326 \text{ ohms}$$

Caida de tensión en la tirilla :

$$0.0326 \times 0.976 = 0.0318 \text{ volts}$$

Que es totalmente despreciable.

La corriente normal por rollo del capacitor de 5 KVA es :

$$I_2 = 6.28 \times 50 \times 8.1 \times 460 \times 10^{-6} \\ = 1.171 \text{ amps.}$$

Esta corriente al circular por tirillas iguales que las anteriores daría también una caída despreciable.

Sin embargo la densidad de corriente sería excesiva con una sola tirilla de estas dimensiones. Conviene poner -



3 tirillas por armadura con una sección recta total de  $3 \times 0.0005 = 0.0015 \text{ pg}^2$ , con la cual se obtiene una densidad máxima de corriente aceptable de :

$$1.171 / 0.0015 = 780 \text{ amp/pg}^2$$

Estas tirillas se pondrán en 3 capas consecutivas al centro de cada armadura (3 en una y 3 en la otra) como se indica en la figura 20, comprimiendo después el rollo según un eje a 49 grados del eje de las tirillas para que queden lo más separadas posible.

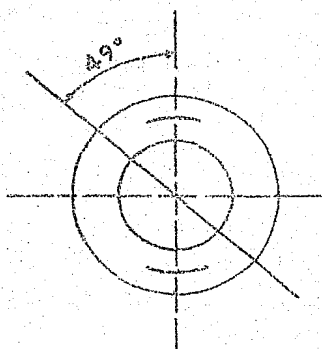
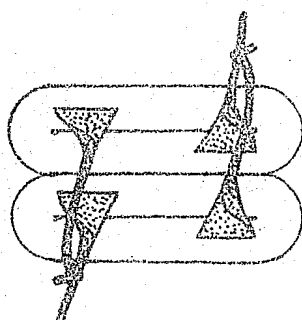


Fig.20

La corriente normal de carga de los dos tipos de capacitores es de :

Capacitor de 2.5 KVA :  $0.976 \times 12 = 11.71 \text{ amp.}$

Capacitor de 5 KVA :  $1.171 \times 10 = 11.71 \text{ amp.}$

#### Resistencias de descarga.

Todo capacitor bien diseñado tiene por característica de conservar su carga durante muchas horas después de haber sido desconectado de la línea que lo alimenta. En consecuencia aparece siempre una tensión eléctrica entre sus terminales que puede ser peligrosa para todo aquél que las toque descuidadamente. Para evitar este peligro, se -

debe provéer a todo capacitor con una resistencia, en derivación con las terminales, a través de la cual se descargue -- éste en un tiempo reducido.

La mayoría de los diseños tanto europeos como americanos establecen el valor de la resistencia de descarga a modo de reducir la tensión a 50 volts en 5 minutos.

Si en el capacitor de 460 volts reducimos la tensión a 46 volts o ses 10%, consecuentemente la carga se -- reducirá también a 10% de la inicial puesto que la carga es proporcional a la tensión ( $Q = CE$ ).

Ahora bien, según la ecuación exponencial de -- carga o descarga de un condensador, la carga ( $q$ ) en un instante dado ( $t$ ) es igual a :

$$q = Q e^{-\frac{t}{RC}}$$

siendo  $Q$  = la carga inicial en coulombs  
 $t$  = el tiempo transcurrido en seg.  
 $R$  = la resistencia derivada en ohms  
 $C$  = la capacitancia en farads

Si hacemos  $q = 10\% Q$

$$t = 3 \text{ minutos} = 180 \text{ seg.}$$

$$C = 75.25 \times 10^{-6} \text{ farads}$$

obtendremos :

$$0.1 Q = Q e^{-\left(\frac{180 \times 10^{-6}}{R \times 75.25}\right)}$$

$$10 = e^X \quad \text{dónde} \quad X = \frac{180 \times 10^{-6}}{75.25 R}$$

El exponente  $X$  es igual a 2.3 y por lo tanto

$$R = \frac{180 \times 10^{-6}}{75.25 \times 2.3} = 1,040,000 \text{ ohms}$$

Poniendo una resistencia comercial de 1 megohm en los dos tipos de capacitores obtendremos la reducción de tensión deseada en 3 y 1.5 minutos.

La corriente de pérdida en esta resistencia es de

$$i_2 = \frac{460}{1,000,000} = 0.00046 \text{ amp.}$$

$$i_1 = \frac{230}{1,000,000} = 0.00023 \text{ amp.}$$

La pérdida en watts o potencia disipada será :

$$W_2 = i_2^2 R = (460 \times 10^{-6})^2 \times 10^6 = 0.212 \text{ watts}$$

$$W_1 = i_1^2 R = 230^2 \times 10^{-6} = 0.053 \text{ watts}$$

Escojaremos en definitiva una resistencia comercial de -  
carbón de 1 Megohm y 0.5 watts.

Las corrientes de pérdida dieléctrica o de fuga a 50 cps  
y en tensiones de 210 a 600 volts son generalmente de -  
0.2 a 0.3 miliamperes por  $\mu\text{f}$ .

Por lo tanto, las pérdidas totales de cada uno de los dos  
tipos de capacitores serán iguales a la suma de "pérdidas  
dieléctricas" y potencia disipada por la resistencia o -  
sea :

$$W_1 = (0.0002 \times 150.5) \times 230 + 0.053 = 6.976 \text{ watts}$$

$$W_2 = (0.0003 \times 75.25) \times 460 + 0.212 = 10.612 \text{ watts}$$

En el primer caso tenemos 2.8 watts/KVAR de pérdida y en -  
el segundo 2.13 watts/KVAR .

#### Cálculo del volumen de aceite necesario.

El volumen interno del tanque es igual a :  
1.238 (ancho)  $\times$  4.538 (largo)  $\times$  3.08 (alto) = 17.3  $\text{dcm}^3$

Volumen de papel Kraft en un rollo :

6 (hojas)  $\times$

2.6 (ancho)  $\times$  0.000127 (espesor)  $\times$  420.6 (largo) = 0.833  $\text{dcm}^3$

Volúmen de aluminio en un rollo :

$$2 \times 2.4 \times 0.000127 \times 417.76 = 0.255 \text{ dm}^3$$

Volúmen del ferro de "Pressboard" de 0.01016 dm de espesor :

$$\text{Area del fondo } 4.538 \times 1.238 = 5.61 \text{ dm}^2$$

$$\text{Area laterales extremos } 1.238 \times 3.1 = 3.84 \text{ dm}^2$$

$$\text{Area laterales } 4.538 \times 3.1 = 14.05 "$$

$$\hline 23.50 \text{ dm}^2$$

$$\text{Volúmen : } 23.5 \times 0.01016 = 0.238 \text{ dm}^3$$

Los laterales se aumentaron de 5 cm en altura para doblar y formar una cubierta.

Volúmen de los dos espaciadores :

$$0.307 + 0.380 = 0.687 \text{ dm}^3$$

Para los dos tipos de capacitores (el de 12 rollos y el de 10 con espaciadores), y despreciando el espacio ocupado por las resistencias, las conexiones y los bushings así como la diferencia entre el cartón aislante de los dos diseños, obtendremos unos volúmenes de :

	2.5 KVAR	5 KVAR
Papel	10.00 dm <sup>3</sup>	8.33 dm <sup>3</sup>
Aluminio	3.06 "	2.55 "
Cartón	0.24 "	0.23 "
Espaciadores		0.687 "
	13.30 dm <sup>3</sup>	11.797 dm <sup>3</sup>
Espacio libre	4.00 "	5.503 "
total	17.30 dm <sup>3</sup>	17.300 dm <sup>3</sup>

Habiendo examinado algunos capacitores

Westinghouse y Line Material podemos decir que un 35 %

del papel Kraft se impregna de aceite. Por lo tanto obtenemos una capacidad total de aceite de :

$$3.50 + 4.00 = 7.5 \text{ litros para } 2.5 \text{ KVAR}$$

$$2.92 + 5.503 \approx 8.5 \quad " \quad " \quad 5 \text{ KVAR}$$

oOocOocOo

CAPITULO V

BREVE ESTUDIO SOBRE CONSTRUCCION Y COSTO DE  
CAPACITORES EN MEXICO

En el capítulo anterior establecimos el diseño de los capacitores propuestos así como sus dimensiones y materiales o partes que los componen. Rescapitularemos ahora brevemente los elementos que entran en la composición de dichos capacitores, estableciendo al mismo tiempo las cantidades necesarias para obtener la producción de unidades ya determinada en el capítulo III y que es de :

90 piezas diarias (2250 mensuales) de 2.5 KVAR  
30 " " ( 750 " " ) de 5 KVAR

A fin de tener una pequeña reserva para suplir algún aumento de demanda repentino y en previsión de substituir las unidades que salgan defectuosas, podríamos aumentar la producción mensual en un 7%, obteniendo entonces aproximadamente :

100 piezas diarias o 2400 mensuales de 2.5 KVAR y  
33 " " " 800 " " 5 KVAR

En estos cálculos se consideraron 24 días hábiles por mes, de 8 horas laborables cada uno.

En todos nuestros cálculos Posteriores consideraremos una reserva inicial de materias primas y partes --

manufacturadas capaz de suplir las necesidades de producción durante 3 meses consecutivos.

Selección y costo de la materia prima.

a) Lámina de acero de 1/16 de pulgada.

Esta lámina para fabricación de los tanques se puede obtener de Altos Hornos de México S.A. (AHMSA) en hojas de 36" x 72" y de 48" x 96" con un costo actual de \$48.00 y 81.00 pesos respectivamente.

Para la producción mensual se necesitarán aproximadamente :

123 láminas de 36" x 72" .....	\$ 5,904.00
532 " de 48" x 96" .....	41,092.00
	\$ 46,996.00

b) Lámina de acero de 1/8 de pulgada.

Esta lámina que servirá para fabricar las orejas de suspensión de las unidades, también se puede obtener de AHMSA en hojas de 48" x 96" con un costo actual de \$148.00. Necesitaremos unas 15 hojas por mes con un costo de \$2,220.00 M.N.

c) Cartón "Pressboard" de 0.010 pg. de espesor.

Este cartón aislante se puede obtener de la fábrica de San Rafael Atlixco (Puebla) en hojas de 28" x 42" a razón de \$2.50 cada una. Mensualmente se necesitarán 12800 hojas con un costo de \$32,000.00 M.N.

d) Cartón "Pressboard" de 0.25 pg. de espesor.

Este cartón que podemos utilizar para formar los espaciadores de las unidades de 5 KVAR, lo fabrican también en San Rafael en hojas de 62" x 84" a razón de \$262.00 cada una. Se requerirán aproximadamente 26 hojas por mes, con un monto de \$6,890.00 M.N.

e) Papel "Kraft" de 0.0127 mm. (0.0005 pg) de espesor.

Como ya indicamos anteriormente, la fábrica de San Rafael Atlixco asegura poder fabricar este papel sin garantizar la carencia absoluta de impurezas, en rollos de 26 cm (10 <sup>15</sup>/<sub>64</sub> pg) de ancho con un peso de 3.12 Kg. por cada 1000 m. y un costo de \$9.00 pesos por Kg. o sean 2.8 centavos por metro lineal.

Según datos anteriores, cada rollo de capacitor tiene una longitud de armaduras de 41.78 m. para 2.5 KVAR o 33.42 m. para 5 KVAR.

Para cada diseño en particular se necesitarán :  
(41.78 m. x 6 + 1.14) 12 = 3,021.87 m. (2.5 KVAR)  
(33.42 m. x 8 + 1.14) 10 = 2,685.02 m. ( 5 KVAR)

lo cual nos dá un costo de papel por capacitor de :

$$0.028 \times 3,021.87 = \$ 84.60 \text{ M.N.}$$

$$0.028 \times 2,685.02 = \$ 75.00 \text{ "}$$

Luego tendríamos mensualmente un costo de :

$$84.60 \times 2400 = \$ 203,000.00$$

$$75.00 \times 800 = \underline{60,000.00}$$

$$\$ 263,000.00 \text{ M.N.}$$

f) Hoja de aluminio de 0.0127 mm. (0.0005 pg) de espesor.

La Reynolds de México fabrica hoja de aluminio eléctricamente puro en este espesor que podría entregar en rollos de 24 cm. de ancho (9 <sup>15</sup>/<sub>32</sub> pg) a razón de \$11.60 el Kg. con un peso de 8.23 Kg. por cada 1000 m. lineales y un costo de 9.85 centavos por metro.

Para cada uno de los diseños de capacitores propuestos, incluyendo tirillas de conexión, se necesitará un total de lámina de :



$$(41.78 \times 2) 12 + 2.50 = 1005.20 \text{ m. (2.5 KVA)}$$

$$(33.42 \times 2) 10 + 2.50 = 670.60 \text{ m. ( 5 KVA )}$$

Esto nos dá un costo de lámina por capacitor de :

$$0.0985 \times 1005.20 = \$ 99.00 \text{ (2.5 KVA)}$$

$$0.0985 \times 670.60 = 66.00 \text{ ( 5 KVA)}$$

Por lo tanto se tendrá un gasto mensual de :

$$99.00 \times 2400 = \$ 238,000.00$$

$$66.00 \times 800 = \underline{52,000.00}$$

$$\$ 291,000.00$$

g) Papel pescado para aislar la resistencia de descarga.

Bastarán unas 7 hojas por m<sup>2</sup> con un total de :

$$\$ 200.00 \text{ M.N.}$$

h) Aceite de ricino industrial.

Este aceite se puede obtener en el país a razón de \$ 2.00 el litro, pero habrá que refinarlo y filtrarlo antes de ser utilizado en los capacitores.

Según vimos en el capítulo IV, se necesitarán 7.5 lt. y 8.5 lt. respectivamente para las unidades de 2.5 y 5 KVAR. Por lo tanto será necesario un total mensual de :

$$7.5 \times 2400 = 18,000 \text{ litros}$$

$$8.5 \times 800 = \underline{6,800 \text{ "}}$$

$$\text{total } 24,800 \text{ litros}$$

o sea un costo de \$ 49,600 M.N.

1) Aisladores de paso y herrajes.

Los aisladores o "bushings" se fabrican en México (Electro Cerámica S.A.) en la actualidad y se pueden suministrar con un birlo central hueco de cobre electrolítico - con cuerda interior para atornillar la terminal tipo mordaza que servirá de tapón al mismo tiempo.

El bushing se montará sobre un empaque de corcho de "Neoprene" de 1/8 pg. de grueso pegado con pegamento rojo

al tanque y al bushing y se sujetará al tanque por medio de una abrazadera de lámina y 4 tornillos con tuercas soldados por la cabeza a la tapa del tanque.

El costo total por bushing resulta ser de :

Bushing de porcelana .....	¢	6.02
Birle de cobre .....		1.60
Empaque de corcho y pegamento .....		0.24
Abrazadera .....		2.80
4 tornillos cabeza plana .....		0.22
4 soldanas de presión .....		0.16
4 tuercas hexagonales .....		0.36
Terminal mordaza .....		2.50
Alambre desnude de cobre .....		0.40
total		¢ 14.30

Para los 3200 capacitores mensuales necesitaremos 6400 aisladores completos con un costo total de \$ 91,520.00 M.N.

o o o

#### PROCESO DE FABRICACION DE LOS CAPACITORES.

El proceso de fabricación completo lo dividiremos en dos etapas principales : la primera para la elaboración de partes y la segunda, para el ensamble, acabado y pruebas finales de las unidades.

1°) Elaboración de partes y pruebas parciales.

##### Fabricación de tanques.

Se deberán cortar a tamaño las láminas de 1/16" y 1/8" por medio de guillotina para formar las cubiertas laterales, los fondos, las tapas y las orejas.

Por medio de una prensa se abrirán los bocados para los bushings en la tapa y se punzonarán las esquinas tanto de la tapa como del fondo.

Luego se deberá proceder a doblar las cejas de las dos piezas anteriores así como a doblar la cubierta lateral y las orejas.

Se soldarán las esquinas de la tapa así como los 8 tornillos que sujetarán los bushings. Luego se soldará la costura de la cubierta lateral. Se colocará el fondo y se soldará interiormente con un cordón continuo y exteriormente con trozos de una pulgada; en definitiva se soldarán las dos orejas.

Tanto el tanque como la tapa se deberán rebabear, luego limpiar con chorre de arena para eliminar las asperezas y por fin sumergir en sosa caústica para quitar la grasa que puedan contener.

#### Montaje de bushings.

El montaje consiste en colocar los empaques de corcho alrededor de los bocados de la tapa, pegándolos con pegamento rojo aislante; luego se montan los bushings y se sujetan por medio de las abrazaderas y las tuercas.

#### Preparación de aislamientos y espaciadores.

Los espaciadores se pueden cortar con guillotina y luego pegar con un pegamento a base de fécula de papa que no se disuelve ni contamina al aceite.

#### Pruebas de papel Kraft.

Debido al papel importante que tiene el dieléctrico en el capacitor, es imprescindible someterlo a pruebas: de densidad, pesando un volumen determinado en estado seco con una balanza de precisión; de porosidad, midiendo la cantidad de aire que fluye a través de una hoja de papel con una diferencia de presiones determinada; de exceso de partículas conductoras que no deben exceder de unas 10 por pie cuadrado, esto se puede medir por medio de un rodillo y una placa metálica formando parte de un circuito eléctrico con una batería y unos audífonos.

### Fabricación de rollos.

Esta operación debe realizarse en un cuarto especial ligeramente húmedo, si es posible, para facilitar el manejo del papel Kraft y con aire perfectamente limpio de polvo principalmente, para evitar futuras contaminaciones con el aceite impregnante.

El enrollado se realiza por medio de una devanadora especial que, básicamente, puede consistir de una plataforma vertical sobre la cual giren los rodillos alimentadores de papel y de aluminio. También vendrá montado el mandril de expansión, de diámetro perfectamente calibrado, sobre el cual se devanan los rollos de capacitor. El mandril deberá girar a baja velocidad para que el alineamiento entre papel y aluminio sea perfecto.

La operación consistirá en enrollar hasta la mitad de vueltas; colocar alternadamente las tirillas y luego seguir enrollando hasta obtener el número de vueltas especificadas en el diseño.

La colocación de tirillas terminales y el corte final se pueden hacer a mano, no importando mucho la irregularidad del corte puesto que la capacitancia no varía con unos centímetros más o menos de armadura.

### Preparación de los rollos.

Cada rollo debe ser prensado ligeramente con una prensa de mano, según el ángulo mostreado en la Fig. 20, de tal manera que las tirillas opuestas queden a la mayor distancia posible. Después se procede a torcer cada grupo de tres tirillas para dejarlas preparadas.

### Presecado de rollos.

Antes de formar los paquetes, sería conveniente dar unas horas de presecado a cada rollo para eliminar la

casi totalidad de humedad que contienen, la cual podría contaminar el aceite impregnante. Esta operación se puede realizar en una estufa calentada con tubos de vapor o bien por medio de rayos infrarrojos, lo cual es más rápido y efectivo. La temperatura no deberá sobrepasar los 160°C para no perjudicar al papel dieléctrico.

Las operaciones siguientes a que quedan sometidos los rollos no deberán de tomar demasiado tiempo para evitar que estos vuelvan a humedecerse excesivamente.

#### Formación de paquetes.

Esta operación se puede efectuar sobre una prensa horizontal.

La operación en sí consiste en colocar sobre la mesa 4 hojas de "pressboard", sobre las cuales se colocan dos púas, verticalmente las 10 o 12 rollos convenientemente prefórados, luego se doblan las hojas hacia arriba y se procede a prensar el paquete al tamaño conveniente sujetándolo con cinchos de cartón.

#### 2ª) Ensamble final y pruebas.

En primer lugar se tendrán que unir las tirillas para conectar los rollos en paralelo y se conectan las resistencias de descarga así como los alambres terminales. Entonces se introducirá cada paquete en su tanque correspondiente, con o sin espaciadores, según el caso, quedando listas las unidades para la primera prueba eléctrica.

#### Prueba eléctrica preliminar.

Esta prueba se efectúa en dos etapas : 1º prueba de aislamiento y 2º) prueba de capacidad.

La prueba de aislamiento se hace aplicando un potencial de 500 volts y 1000 volts respectivamente entre

terminales para las unidades de 230 y 460 volts. La prueba de aislamiento a tierra se logra aplicando voltajes de 3000 y 5000 volts respectivamente entre terminales y el tanque durante 1 minuto. La prueba preliminar de capacidad se puede hacer con el puente de Schering indicado en el capítulo IV.

Las unidades que se rechacen después de esta prueba preliminar deberán ser examinadas más detalladamente en la sección de "productos rechazados" a fin de corregir sus defectos.

#### Colocación y sellado de tanques.

Se pasan los alambres terminales por los orificios de los bushings y se colocan las tapas en su lugar procediendo inmediatamente a soldarlas a la caja con un cordón corrido a lo largo de la caja y eliminando las asperezas con esmeril.

Después se probará la hermeticidad de la caja sumergiéndola en agua.

#### Llenado de tanques con aceite.

Esta operación se puede realizar en una estufa similar a la del presecado, donde elevaremos la temperatura hasta unos 160°C para lograr la evaporación de los últimos vestigios de humedad interna. La estufa deberá tener en el interior una serie de tuberías principales y de mangueras que se conectarán a los dos bushings de cada unidad. Por uno de ellos se aplicará un vacío progresivo hasta llegar a un valor cercano a un milímetro de mercurio, sosteniendo al mismo tiempo la temperatura externa entre 130 y 160°C para eliminar la humedad y el aire que pueda contener el tanque. Luego se abrirán las válvulas del aceite, procediendo a llenar lentamente para evitar la formación de burbujas. Al terminar el llenado se sacarán y sellarán inmediatamente los bushings.

Prueba eléctrica final.

Se efectuarán de nuevo las pruebas anteriores de aislamiento a tierra y de sobrevoltaje entre terminales y, con el puente de Schering, se hará nuevamente una prueba de la capacitancia, que no deberá ser menor del 100% de la nominal, ni mayor del 115% a la tensión y frecuencia normales. Al mismo tiempo se podrá medir el factor de potencia del die eléctrico el cual nos dá la base para calcular las pérdidas, que no deberán exceder de  $3 \frac{1}{3}$  watts por KVAR a la frecuencia y tensión nominales y a una temperatura de 25°C.

A c a b a d o.

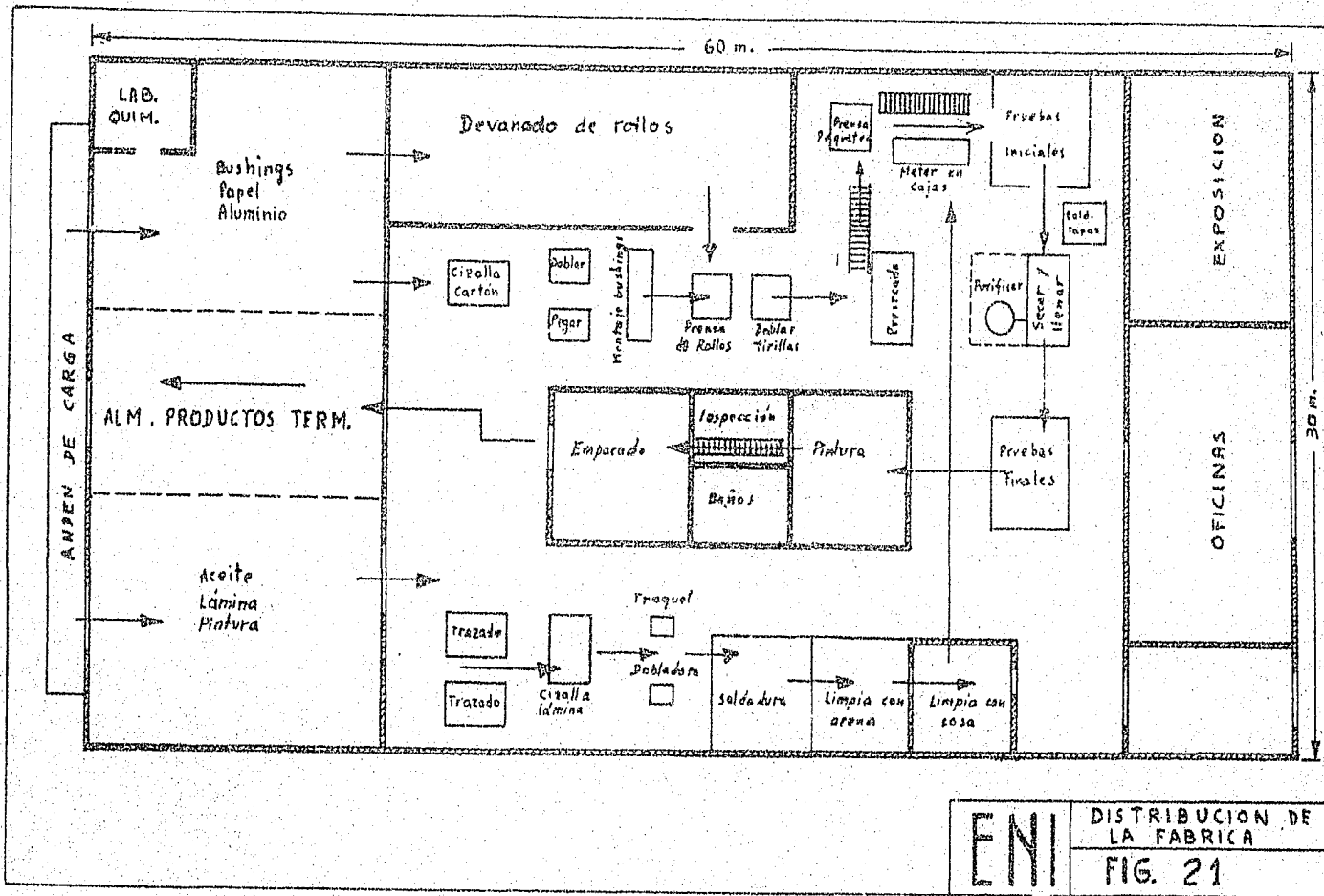
El acabado consiste en aplicar una capa de primer y una o dos capas de pintura gris con pistola de aire, dejando secar al aire. Habrá que proceder a una inspección final externa antes de aprobar el producto y de colocarle su placa de datos correspondiente.

o o o

SELECCION Y COSTO APROXIMADO DE LA MAQUINARIA.

Un análisis somero de los procesos y tiempos de fabricación nos indica que necesitaremos aproximadamente el equipo siguiente :

- 1 - Cizalla para lámina de 0.125 pg., de 6ft. de longitud de corte ..... \$ 75,000.00 M.N.
- 1 - Cizalla de mano para cartón de 0.250 pg. de espesor con 6 ft. de longitud de corte: \$ 12,000.00 M.N.
- 1 - Prensa de banco, de simple acción, de una tonelada de capacidad, 2 pg. de carrera: \$ 10,000.00 M.N.
- 1 - Dobladora de mano de 30 pg. max. de bancada, para lámina de 0.125 pg. de espesor : \$ 5,000.00 M.N.
- 5 - Esmeriles portátiles eléctricos de  $\frac{1}{3}$  HP, con piedra de 4" x  $\frac{1}{2}$ " x  $\frac{5}{8}$ " y cepillo de alambre : cada uno ..... \$ 2,000.00 M.N.
- 1 - Limpiador por chorro de arena de  $\frac{1}{4}$  pg. de diámetro del chorro con 10 lb por pg.<sup>2</sup> de presión: \$ 20,000.00 MN.



ENI

DISTRIBUCION DE  
LA FABRICA

FIG. 21



- 1 - Tanque de sosa cáustica de 1 m. x 0.80 x 1 m. aprox. :  
\$ 10,000.00 M.N.
- 1 - Tanque de agua caliente de iguales dimensiones: \$ 2,000.00
- 6 - Soldadoras de C.D. portátiles, tipo moto-generador de  
200 amperes : \$ 5,000.00 cada una.
- 2 - Casetas de pintura con pistolas de aire : \$ 5,000.00 MN.
- 10 - Devanadoras para rollos con motor- reductor de 1 HP y  
velocidad de 100 r.p.m. en la polea. Esta velocidad an-  
gular es la necesaria para que el papel no circule a -  
más de 30 M./min. y se pueda inspeccionar y evitar la  
formación de arrugas : \$ 12,000.00 cada una.
- 1 - Prensa manual de palanca para formar los rollos: \$5,000.00
- 1 - Prensa manual de manivela, de montaje horizontal sobre  
banco, con una luz mínima de 25 pg. para prensado de -  
paquetes : \$ 8,000.00 M.N.
- 2 - Estufas para secado y llenado de aceite al vacío :  
\$ 20,000.00 M.N.
- 1 - Purificador de aceite Hilco de 50 gal/hr. \$ 40,000.00 MN.
- 1 - Equipo probador eléctrico : \$ 30,000.00 M.N.  
Tanque de agua fría; bancos de madera, bandas y trans-  
portadores de rodillos, polipastos, compresoras, herra-  
mientas, equipo químico, etc.. : \$ 60,000.00 M.N.

Toda la maquinaria y equipos en general suman la cantidad apro-  
ximada de : ..... \$ 462,000.00 M.N.

Las dimensiones y distribución aproximada de la planta están  
indicadas en la Fig. 2B donde se desprende que necesitaremos  
un edificio de unos 30 m. de ancho por 60 m. de largo, inclu-  
yendo oficinas, baños, almacenes, etc. Este edificio, inclu-  
yendo cimentaciones de máquinas, servicio de agua, drenajes,  
alumbrado y alimentación de potencia eléctrica por medio de  
una subestación de unos 200 KVA, costará unos \$ 300,000.00 MN.  
y el terreno considerado en la zona de Tlanepantla (Edo. de  
México) podrá obtenerse probablemente por unos \$ 50,000.00 M.N.

Estimación del personal necesario.

Tomando en cuenta la producción diaria de unidades y los procesos de fabricación indicados podemos estimar el número de trabajadores como de :

<u>OPERACION</u>	<u>TRABAJADORES</u>
Trazado, corte, punzonado	1 operario
Doblar láminas	1 "
Soldadura	6 soldadores
Esmerilar	5 operarios
Limpia con arena	1 operario
Limpia con sosa	1 "
Cortar y pegar espaciadores	1 "
Montaje de bushings	2 montadoras
Devanado de rollos	10 devanadoras
Presecado de rollos	1 operario
Doblar tirillas	3 operarias
Presecado	1 operario
Preparar, conectar paquetes y meter en caja	1 operario
Prueba química	1 químico
" eléctrica	1 probador
" hermeticidad	1 ayudante
Llanado de aceite	1 operario
Pintura	2 pintores

La mano de obra directa se compondrá por lo tanto de unos 38 trabajadores con una nómina mensual aproximada de:  
 ..... \$ 40,000.00 M.N.

Por otra parte, tendremos los gastos indirectos de operación que son : reparaciones de herramientas y máquinas; mantenimiento de la fábrica; servicios de aseo, de vigilancia, de inspección, de transporte interno; servicio de almacenes; analistas; departamento de diseño; departamento de producción, etc..

Podemos estimar conservadoramente los gastos indirectos como de unos : ..... \$ 100,000.00 M.N.

Estableceremos a continuación el costo del producto fabricado, partiendo de un precio de venta estimado a-bajo de los precios de venta de unidades similares importadas.

Los precios actuales de capacitores de 2.5 y 5 KVAR en 230 y 460 volts, 50 cps. son :

- Westinghouse .....	\$ 690.00 pesos
- Sprague .....	585.00 "
- Cornell Dubilier .....	580.00 "
- ASBA .....	600.00 "

Por lo tanto, si vendemos nuestras unidades a \$450.00 pesos cada una y obtenemos un beneficio del 15%, podremos considerar que la fabricación es productiva y además estaremos fuera de toda competencia, máxime si se aplican tarifas aduanales a las unidades importadas que actualmente entran en el país libremente.

Suponiendo que nuestra venta sea de 3,000 unidades mensuales a razón de \$450.00 cada una, tendremos un total de ventas facturadas de \$ 1,350,000.00 M.N.

COSTO DEL PRODUCTO.

La Fábrica podrá construirse e instalarse totalmente, cuando menos, en un año. Por lo tanto necesitaremos un capital inicial para cubrir los gastos diarios (caja); la compra de materia prima para un ciclo de 3 meses de producción; los sueldos y salarios de obreros constructores y montadores; el costo del terreno y de la obra; los equipos en general; los gastos legales, etc..

Los equipos en general se descomponen en :

-Equipo de Oficina .....	\$ 63,000.00 pesos
-Equipo de bodegas .....	10,000.00 "
-Equipo contra incendios .....	5,000.00 "
-Equipo de transporte de material ....	50,000.00 "
	<hr/>
	128,000.00 pesos

Los gastos preliminares se descomponen en la forma siguiente :

-Gastos legales .....	₡ 15,000.00	pesos
-Sueldos y Salarios .....	96,000.00	"
-Rentas .....	4,000.00	"
-Gastos generales de Administración	180,000.00	"
-Instalación de Maquinaria .....	50,000.00	"
	<hr/>	
	₡ 345,000.00	pesos

BALANCE INICIAL :

Activo circulante:

-Caja	₡ 400,000.00	
-Inventarios (materias primas)	2,050,000.00	
	<hr/>	
	₡ 2,450,000.00	pesos

Activo fijo :

-Terrenos	50,000.00	
-Edificios	300,000.00	
-Maquinaria	412,000.00	
-Herramientas	50,000.00	
-Equipos en geral.	128,000.00	
	<hr/>	
	940,000.00	pesos

Cargos diferidos: Gastos preliminares 345,000.00 "

CAPITAL NECESARIO ₡ 3,735,000.00 pesos

ESTADO DE PERDIDAS Y GANANCIAS MENSUALES

Ventas netas facturadas	₡ 1,350,000.00	100%
Costo de Ventas :		
Materiales	790,000.00	
Mano de Obra	40,000.00	
Gastos indirectos	100,000.00	
	<hr/>	
	₡ 930,000.00	68.9%
Utilidad Bruta	420,000.00	31.1%
Gastos de Venta y Administración :		
(10% sobre ventas)	135,000.00	10.0%
Gastos preliminares (al 9% anual)	5,750.00	0.4%
Gastos financieros (al 9% anual)	28,000.00	2.1%
	<hr/>	
Utilidad antes de Impuestos	₡ 251,250.00	18.6%

	\$ 251,250.00	
Impuestos aproximados	<u>50,000.00</u>	3.7%
Utilidad Neta	\$ 201,250.00	14.9%

Como vemos, a través de este cálculo preliminar, vendiendo los capacitores a \$450.00 pesos cada uno, podríamos obtener una utilidad estimativa de 14.9% , la cual es razonable y normal en la industria Mexicana.

El costo unitario de fábrica de los capacitores será de :

-Material directo	\$ 263.33
-Mano de obra directa	13.33
-Gastos indirectos	<u>33.33</u>
	\$ 310.00

Para terminar, me resta decir que la instalación de una fábrica de este tipo está sujeta, antes que nada, a un riguroso estudio de las propiedades de los materiales nacionales, principalmente el aceite de ricino, y a la posibilidad de obtenerlos a bajo precio y de las características exigidas por el producto, es decir los condensadores industriales, que es uno de los aparatos más delicados en su construcción .

ooo

México, D.F., a 12 de Octubre de 1955  
Claudio Gómez Vuistas

## B I B L I O G R A F I A

- Power System Stability - Crary  
Power-Factor Economics - Price L. Rogers  
Industrial Electricity - Daves  
Electrostatics - Smythe  
Máquinas Síncronas - Carlos Luca  
Máquinas de Inducción - Carlos Luca  
Audels New Electric Library - Vol. VI  
Std. Handbook for Elec. Engineers - Maxwell  
Insulation of Electrical Apparatus - Miner  
Electric Insulators and Dielectrics - Schwaiger  
Enciclopedia de Química Industrial - Ullman  
Electric Insulators - Manning  
Chart of Solvents, Diluents and Plasticizers - Shell Corporation  
Generación y Distribución de Energía Eléctrica en México - Depto. Investigaciones Industriales del Banco de México.  
Power Capacitors - R.E. Marbury  
Capacitors for Industry - Elcom Kist

D a t o s de la C.F.E. - Compañía de Luz -  
Industria Eléctrica de México S.A.  
Secretaría de Economía  
Fábricas de papel de San Rafael Atlixco  
Beik and Felix (aceite)  
Reynolds de Mexico, AEMSA

### Catálogos de :

- Westinghouse - General Electric  
Line Material - Sprague Electric Company  
ACEC - Siemens Schuskert