

Lej. 133.

U.N.A.M.

Facultad de Ingeniería

Aplicación de Capacitores en Alimentadores de Distribución de Energía Eléctrica

T E S I S

Que para obtener el título de :
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

p r e s e n t a n :

**AUGUSTO SAGAON SANDOVAL
EFREN MARTIN CARPIO HERNANDEZ
BERNARDO SANTANA**

México, D. F.

1979





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.

APLICACION DE CAPACITORES EN

ALIMENTADORES DE DISTRIBUCION DE ENERGIA ELECTRICA

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

Un sistema eléctrico de potencia está constituido por las plantas generadoras, las subestaciones elevadoras y reductoras, las líneas de transmisión, los sistemas de distribución y las cargas.

Todos estos elementos están interrelacionados entre sí para cumplir con un fin, generar y transmitir energía eléctrica a los centros de carga. En la transmisión de la energía eléctrica nos encontramos con varios problemas como son: pérdidas por efecto Joule, pérdidas por efecto corona, problemas de estabilidad, de regulación de voltaje, de variación de carga, de flujo de reactivos, problemas por bajo factor de potencia, y otros de menor importancia.

Todos estos problemas repercuten en la eficiencia del sistema y en la calidad de la energía entregada a los usuarios. Por lo que es de vital importancia buscar soluciones para cada uno de estos problemas.

Nuestro estudio será enfocado al problema del flujo de reactivos, ya que estos originan un incremento considerable en las pérdidas por efecto Joule (energía disipada en

las líneas), bajo factor de potencia y caídas excesivas de voltaje en los conductores.

Existen diferentes medios de contrarrestar los flujos de reactivos, estos son:

- a) Generador
- b) Motor síncrono
- c) Condensador síncrono
- d) Bancos de capacitores

De todos estos los "bancos de capacitores" resultan ser los más convenientes por sus características de bajo mantenimiento y costo, así como su facilidad de ser conectados al sistema en el lugar requerido. Razones por las cuales el presente estudio se ocupa solo de resolver este problema por medio de "bancos de capacitores" en base a su ubicación adecuada.

C O N T E N I D O

	INTRODUCCION	i
CAPITULO I	CAPACITORES	
1.1	Bosquejo histórico	3
1.2	Generalidades de los capacitores	7
1.3	Aplicación de los capacitores	11
1.4	Corrección del factor de potencia	13
1.5	Aumento de la potencia activa en los transformadores	20
1.6	Reducción de pérdidas por efecto Joule	25
CAPITULO II	UBICACION DE CAPACITORES	
	Introducción	
2.1	Descripción de bancos fijos y desconectables	30
2.2	Método Schmill	32
2.3	Caídas de Voltaje	50
2.4	Efectos de caída de voltaje	54
2.5	Método de control de voltaje	60
2.6	Regulación de voltaje	70
CAPITULO III	RELEVACION DE CARGA Y REDUCCION DE PERDIDAS.	
	Introducción	
3.1	Relevación de carga	76
3.2	Reducción de pérdidas	80
3.3	Introducción a un problema real	81
	a) Análisis económico por relevación	
	b) Análisis económico por reducción de pérdidas la., 2a., 3a. y 4a. alternativas.	
3.4	Análisis de alternativas	116
CONCLUSIONES.		
BIBLIOGRAFIA.		

C A P I T U L O I

CAPACITORES

- 1.1 Bosquejo Histórico**
- 1.2 Generalidades de los capacitores**
- 1.3 Aplicaciones de los capacitores**
- 1.4 Corrección del factor de potencia**
- 1.5 Aumento de la potencia activa en los transformadores.**
- 1.6 Reducción de pérdidas por efecto Joule.**

1.1 BOSQUEJO HISTORICO

El Capacitor Eléctrico o Condensador fué descubierto a mediados del siglo XVIII, - siendo su forma primitiva un cilindro de vidrio recubierto en sus paredes interna y externa de una delgada lámina conductora que almacena cargas eléctricas, bajo la ley de que la cantidad de carga eléctrica almacenada es inversamente proporcional al - espesor del medio aislante interpuesto entre las láminas metálicas. Se debe a Faraday el descubrimiento de que el almacenamiento de las cargas eléctricas dependía - también del medio aislante empleado, mostrando que la capacidad de almacenamiento específica de sustancias tales como el azufre, la laca y el vidrio era considerablemen - te mayor que la del aire. Faraday en sus estudios y experimentos, introdujo el concepto del Dieléctrico y determinó las primeras constantes Dieléctricas.

Sin embargo, fué hasta principios del siglo XX cuando empezó a fabricarse el capaci - tor en forma industrial, utilizándose para corregir el factor de potencia en el año de - 1914. Su uso sin embargo, estuvo limitado durante los siguientes 20 años debido al - alto costo, gran tamaño y peso. Al principio los dieléctricos utilizados en la fabrica - ción de capacitores fueron: papel impregnado en laca, cera de abejas y parafina y - poco más tarde, papel impregnado de aceite mineral, naftaleno, petróleo, aceite de si - licones y polibutano. Según las aplicaciones específicas, también se han venido uti -

lizando dieléctricos de vidrio, cerámica, mica, óxidos de aluminio o tántalo, plástico laminado, aire, electrolitos como ácido bórico, ácido fosfórico, etcétera. En el año de 1932 la introducción de los askareles (Hidrocarburos Aromáticos Clorados) como impregnantes, produjo una verdadera revolución en las técnicas de los capacitores de potencia; bajando bruscamente los tamaños, pesos y costos de las unidades, lo grándose además un gran avance en la seguridad de su uso, debido al hecho de ser - incombustible el nuevo impregnante.

Antes de 1937 prácticamente todos los capacitores estaban instalados en locales protegidos; pero con la aparición de unidades para uso en intemperie se produjo un gran - avance pues se eliminaron gran cantidad de accesorios, reduciéndose aún más el gasto de operación. Desde entonces, el uso de capacitores de potencia se ha venido incrementando año tras año, de una forma extraordinaria.

Ultimamente, la introducción de los dieléctricos de plástico en los capacitores de alta tensión, ha marcado un nuevo paso adelante en la tecnología del capacitor de potencia, el nuevo sistema dieléctrico a base de papel - plástico - askarel, ha hecho - posible la aparición de unidades significativamente más compactas, más resistentes a las descargas parciales, de mayor vida media y pérdidas dieléctricas considerablemente más bajas.

Resumiendo, la aceptación de los capacitores en los últimos años se ha incrementado debido a lo siguiente :

1. Reducción del precio de venta

2. **Mejoramiento en los métodos de diseño y fabricación dando como resultado capacitores de pequeño tamaño y peso.**
3. **Desarrollo de unidades de interperie y estandarización de los bancos tipo poste.**
4. **Reducción de fallas y pérdidas internas**
5. **Escaso o nulo mantenimiento**
6. **Mejor funcionamiento de los sistemas donde se usan capacitores.**

En la Figura 1.1 se indica el incremento del uso de capacitores y la disminución del tamaño de éstos en los últimos años.

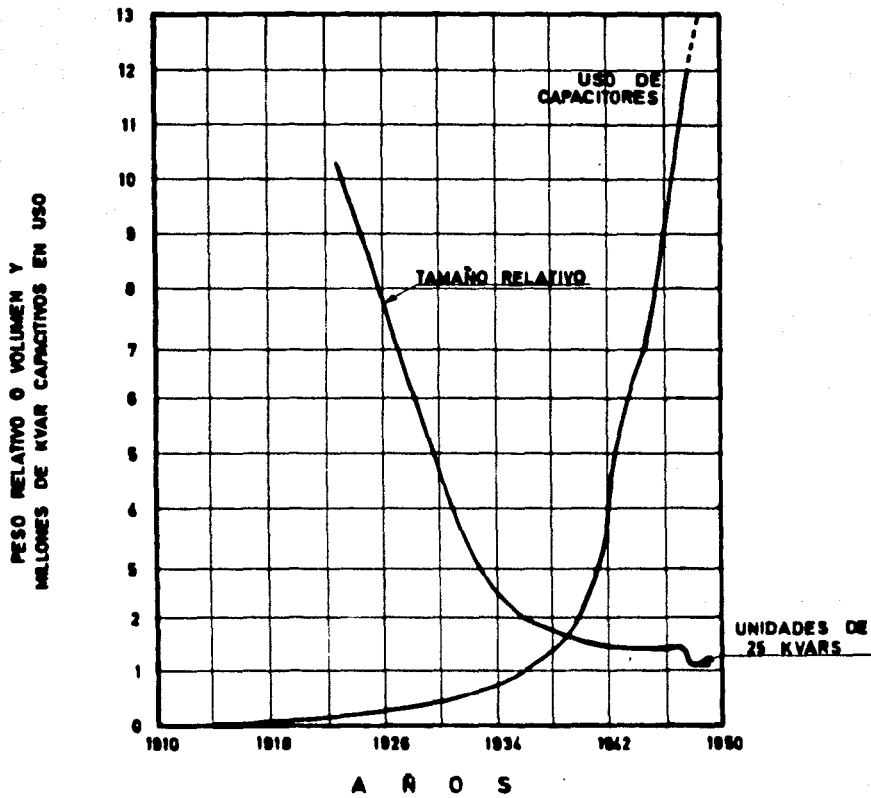


Fig. 1.1 EVALUACION DEL TAMAÑO Y USO DE CAPACITORES EN DERIVACION.

1.2 GENERALIDADES DE LOS CAPACITORES

Primeramente podemos decir que la acción del capacitor es la de almacenar carga, es to se logra por medio de un dieléctrico que se encuentra entre las placas conductoras.

Para iniciar el estudio pensemos en que conectamos dos placas conductoras paralelas entre si y analicemos lo que sucede.

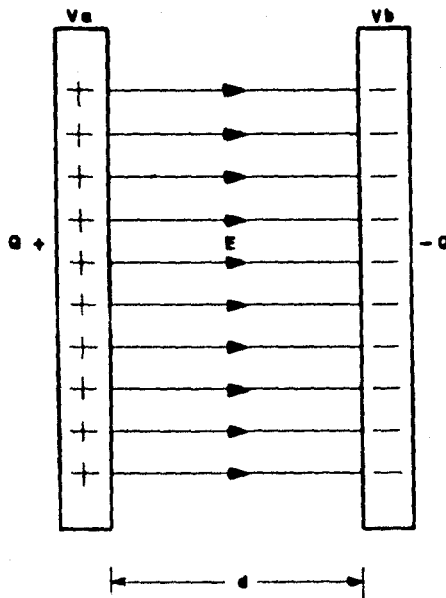


Fig. 1.2 Condensador Plano

Debido a la distinta polaridad entre las dos placas, una de ellas tendrá exceso de electrones y la otra exceso de protones, y como entre las dos placas existe un dieléctrico (medio no conductor) entonces no puede existir el flujo de electrones, pero se forma una fuerza de atracción entre las cargas llamadas Electrostricción igual a:

$$F = \frac{\epsilon q^2}{2 A} = \frac{1}{K_e} \left[\frac{\epsilon_0 q^2}{2 A} \right] \quad 1.1$$

Donde:

q = Carga total en cada una de las placas

K_e = Constante del dieléctrico

ϵ = Capacidad específica de inducción del vacío

A = Área de las placas

Esta fuerza de atracción forma un campo eléctrico (E) en el dieléctrico, el cual está dado por la expresión:

$$E = \frac{1}{K_e \epsilon_0} \left[\frac{q}{A} \right] \quad 1.2$$

Debido al campo eléctrico, se produce un desplazamiento (D) de cargas en el dieléctrico que es igual a :

$$D = \epsilon E = K_e \left[\epsilon_0 E \right] \quad 1.3$$

O también

$$D = q/A \quad 1.4$$

También es sabido que se forma un campo eléctrico que es inversamente proporcional a la distancia de separación entre las placas, es decir:

$$E = \frac{V}{d} \quad 1.5$$

Donde:

V = Voltaje entre las placas conductoras

d = Distancia de separación entre las placas

Por lo tanto, sustituyendo 1.4 y 1.5 en 1.3 tenemos que:

$$\frac{q}{A} = \frac{\epsilon V}{d} \quad 1.6$$

Y de esta expresión que podemos escribir en la siguiente forma, se define el concepto de capacitancia (C).

$$q = \frac{\epsilon A}{d} V \quad 1.7$$

Donde:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad 1.8$$

Por lo tanto

$$q = CV \quad 1.9$$

Como se puede ver en la expresión 1.7 la capacitancia depende del dieléctrico que se usa, del área de las placas usadas y la distancia entre las mismas.

Todo el estudio anterior se ha hecho para cierto instante en el tiempo, en el cual la polaridad de las placas es la de ese instante. Pero, como es sabido en los sistemas de potencia se trabaja con corriente alterna, por lo tanto, la polaridad en cada una de las placas se estará invirtiendo de acuerdo a la frecuencia de operación del sistema. Para poder introducir este hecho a nuestras ecuaciones debemos derivar con

respecto al tiempo la ecuación 1.8.

$$\frac{dq}{dt} = C \frac{dV}{dt} \quad 1.10$$

Pero sabemos que:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad 1.11$$

Luego entonces sustituyendo 1.11 en 1.10, tenemos que:

$$i = C \frac{dV}{dt} \quad 1.12$$

Donde:

i = corriente (variación de la carga con respecto al tiempo)

Esta expresión nos dice que existe una corriente en el capacitor que depende de la variación del voltaje. Esta corriente no fluye a través del dieléctrico sino que realmente consiste en un desplazamiento de cargas, que en un medio ciclo van hacia -- las placas y en el siguiente medio ciclo salen de las placas. Y como cuando a una placa llegan los electrones, de otra salen, esto da la impresión de que si fluye la corriente por el dieléctrico, pero sabemos que esto no puede suceder.

1.3 APLICACION DE LOS CAPACITORES

Como este estudio está enfocado a la localización de los capacitores en sistemas de potencia, analizaremos exclusivamente su aplicación a ellos.

Las finalidades que se persiguen al usar capacitores básicamente son cuatro :

1. Mejorar el factor de potencia.
2. Aumentar la capacidad de carga de los transformadores y líneas eléctricas.
3. Reducir pérdidas por efecto Joule.
4. Elevar niveles de voltaje y mejorar la regulación :
 - a) Compensando la línea
 - b) compensando la carga

Es práctico instalar bancos de capacitores para disminuir los problemas debidos a los reactivos inductivos, existiendo puntos óptimos en los cuales, resultará más conveniente instalar los bancos de capacitores para lograr así disminuir lo más posible alguno de los problemas vistos. Sin embargo, los lugares óptimos donde se localizan los capacitores para la solución de cada uno de los problemas mencionados frecuentemente resulta no ser el óptimo para los restantes.

Por ejemplo, al enfocar la ubicación de los capacitores al mejoramiento de la regulación de voltaje, no significa que no se mejorará el factor de potencia o los otros

puntos mencionados, sino que podría haberse corregido más si se hubiese pretendido-
eso.

Cabe mencionar que en todos los casos, de ser posible el banco de capacitores se bus
cará instalar en el lado de alta tensión del sistema, esto se debe a que los capacitores para alta tensión son de 10 a 15 veces más económicos que los de baja tensión, -
la diferencia de costo estriba en que para alta tensión se manejan corrientes más pequeñas.

A continuación son analizados tres de los beneficios mencionados, el cuarto se estudiará en el siguiente capítulo.

1.4 CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

Las cargas industriales se caracterizan por estar formadas de una parte resistiva y una inductiva. La parte resistiva es aquella que consume una corriente que se encuentra en fase con el voltaje aplicado, la potencia consumida por una carga resistiva es -- transformada integralmente en trabajo productivo, como ejemplo de este tipo de cargas podemos citar: lámparas incandescentes, aparatos de calefacción y otros. La parte inductiva es aquella que consume una corriente que esta defasada con respecto al voltaje, esta corriente es usada en la energización de los circuitos magnéticos de los dispositivos de inducción.

En general toda carga consume una corriente formada de una parte real (productora de trabajo) y otra parte inductiva (magnetizante), la razón de la corriente real a la corriente total se le define como factor de potencia, también llamado $\cos \theta$, este $\cos \theta$ nos sirve para conocer la magnitud de la corriente inductiva que está consumiendo una carga. Para visualizar claramente el concepto de factor de potencia se muestra la siguiente figura:

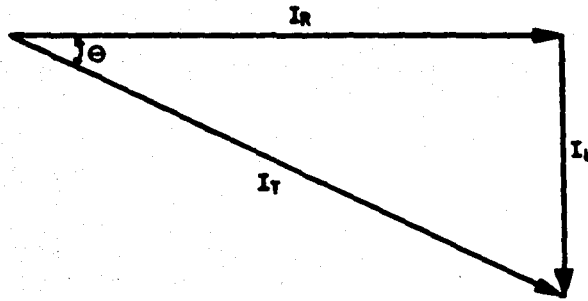


Fig. 1.3 Triángulo de Corrientes

De la fig. 1.3 se deduce la siguiente relación trigonométrica:

$$\cos \theta = \frac{I_R}{I_T} = \text{F.P.} \quad 1.13$$

En donde:

f.p. = factor de potencia

I_R = corriente real

I_L = corriente reactiva

I_T = corriente total

El hecho de que exista un bajo factor de potencia en una industria, da motivo a un aumento de intensidad de corriente, lo que origina pérdidas por efecto Joule ($R I^2$) y fuertes caídas de tensión, obligando, además a los distribuidores de energía eléctrica a aumentar la potencia de sus plantas generadoras, transformadores y líneas. Por estas razones se autoriza al distribuidor de energía a cargar una penalidad a su usua

rio, de acuerdo con el criterio de la Tarifa Eléctrica en vigor en México, publicada en Diario Oficial del 15 de octubre de 1973.

De acuerdo con la tarifa, cuando el factor de potencia tenga un valor inferior a 85% aparecerá en su recibo un renglón que dice "CARGO POR BAJO FACTOR DE POTENCIA", como se ilustra en la fig. 1.4. Siendo 61.377 el factor de potencia promedio durante el período de facturación.

En las cifras de la fig. 1.4 se ve que la cantidad facturada por energía útil KW-H es de \$20,570.90 y el cargo por bajo factor de potencia se obtuvo

$$\left(\frac{85}{61.377} - 1 \right) \times 20570.90 = 7917.35 \quad 1.14$$

En la tabla 1.1 se muestra el porcentaje de penalidad que resulta al ir bajando el f.p. de 0.85.

Normalmente, la forma más práctica y económica para eliminar el cargo por bajo factor de potencia es mediante la instalación de capacitores de potencia en su sistema eléctrico.

Para determinar la cantidad de capacitores necesarios, conocido el f.p. actual y dado que el valor mínimo permitido es 85%, podemos basarnos en la tabla 1.2 y, conociendo la demanda máxima medida en KW (en el ejemplo de la fig. 1.4 360 KW), determinar la cantidad de capacitores necesarios en KVAR.

Así, de la tabla 1.2 entramos en el renglón de 61% y vamos hasta la columna 85% encontramos un valor de 0.679, que multiplicado por 360 KW, nos da 245 KVAR

como mínimo.

Con objeto de asegurar que bajo cualquier condición de carga, tenemos 85% de factor de potencia como mínimo, conviene aumentar a un valor ligeramente mayor, por ejemplo 88%, para lo cual se requiere.

$$0.754 \times 360 = 272 \text{ KVAR}$$

De esta forma se ha ejemplificado el cálculo del banco necesario para corregir el -- factor de potencia.

COMPANIA DE LUZ Y FUERZA DEL CENTRO, S. A.

CALZ. MELCHOR OCAMPO No. 171
MEXICO 17 D.F.

APARTADO POSTAL No. 490
ZONA POSTAL No. 1

Ced. Ing. Merc.
No. 54175

CASA SANCHEZ PEREZ, S.A.
Montevideo No. 345
Ciudad Serdán, Pue.

Cta. 001-020-14

POR LA ENERGIA ELECTRICA SUMINISTRADA
DURANTE EL PERIODO COMPRENDIDO DEL 10
DE FEBRERO DE 1974 AL 04 DE MARZO DE
1974

TARIFA 8 DEMANDA 470 KW

MEDS. NOS. LECT. ANT. LECT. ACT. CONST.

925957	00	15			
925058	00	22			
925059	00	20	1000.0	-----	
1920558		360	1000.0	57000 KWH	
				360 KW	
9005071	00	40			
9005072	00	38			
9005073	00	49	577.3	-----	
				73318 KVARH	

DE 02-10-74 a 03-04-74 22 ds. D-470 57000 KWH
EGG. FDP BAJO FACTOR DE POTENCIA 61377

\$20,570.90
7,917.35

SALDO A PAGAR:

\$28,488.25

FIGURA 1.4

F.P. ACTUAL	F.P. MINIMO	% DE PENALIDAD	F.P. ACTUAL	F.P. MINIMO	% DE PENALIDAD
84	85	1.19	69	85	23.19
83	85	2.41	68	85	25.00
82	85	3.66	67	85	26.86
81	85	4.94	66	85	28.78
80	85	6.25	65	85	30.77
79	85	7.59	64	85	32.81
78	85	8.97	63	85	34.92
77	85	10.39	62	85	37.09
76	85	11.84	61	85	39.34
75	85	13.33	60	85	41.66
74	85	14.86	59	85	44.06
73	85	16.43	58	85	46.55
72	85	18.05	57	85	49.12
71	85	19.72	56	85	51.78
70	85	21.40	55	85	54.54

TABLA 1.1

1.5 AUMENTO DE LA POTENCIA ACTIVA DE LOS TRANSFORMADORES

Como se dijo anteriormente la corriente necesaria para el funcionamiento de los transformadores se puede dividir en dos tipos de corriente: corriente activa y corriente reactiva o magnetizante, por lo tanto, la capacidad de este dispositivo de potencia depende en gran parte del comportamiento y relación existente entre las dos corrientes.

Para una mejor comprensión del aumento de la potencia activa, se puede partir de la siguiente relación de potencias.

$$KW = KVA \times f. p. \qquad 1.15$$

Donde :

KW = potencia real

KVA = potencia aparente

f. p. = factor de potencia

De esta ecuación se puede ver que la capacidad del transformador está en función directa del factor de potencia, luego entonces, aumentando este de un valor $\cos \theta_1$ a $\cos \theta_2$ se logra el aumento de la potencia activa del transformador. Por lo tanto se puede decir que suministrando potencia reactiva por medio de capacitores de potencia se logra un incremento de la potencia activa (KW).

A continuación deduciremos la expresión matemática del incremento de potencia activa disponible y para una mejor comprensión nos auxiliaremos del triángulo de poten--

cias de la fig. 1.5 de ella se obtiene la siguiente ecuación:

$$\Delta K W = KW_2 - KW_1 = KVA (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \quad 1.16$$

Donde:

KW_1 = potencia real del transformador antes de instalar los capacitores.

KW_2 = potencia real del transformador después de instalar los capacitores.

ΔKW = incremento de potencia activa.

KVA = potencia total o aparente del transformador

$\cos \theta_1$ = factor de potencia del transformador antes de instalar los capacitores.

$\cos \theta_2$ = factor de potencia del transformador después de instalar los capacitores.

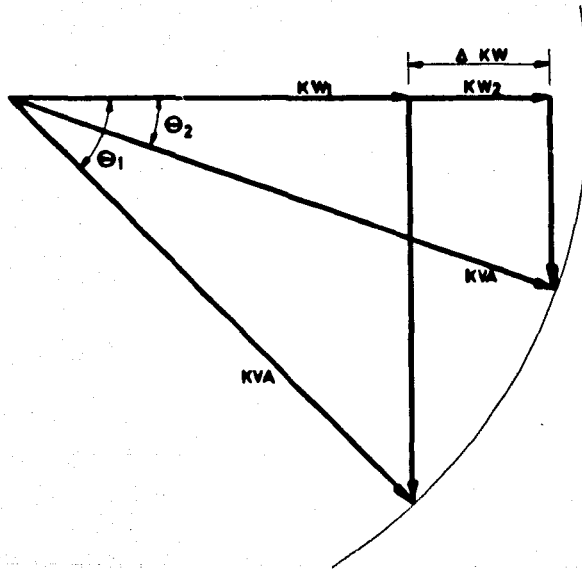


Fig. 1.5 Aumento de la Potencia Real de un Transformador.

Otra forma de cálculo del incremento de potencia real KW en porciento de la potencia nominal se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\Delta K W = \frac{KW_2 - KW_1}{KW_1} \quad 1.17$$

Tomando:

$$KW_1 = KVA \cos \theta_1$$

$$KW_2 = KVA \cos \theta_2$$

Haciendo operaciones llegamos a una expresión más sencilla y exacta:

$$\Delta K W = 100 \left[\frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} - 1 \right] \quad 1.18$$

la cual únicamente está en función del f.p. inicial y final.

Del triángulo de la fig. 1.5 se ve que aumentando el factor de potencia de $\cos \theta_1$ a $\cos \theta_2$ hay un incremento KW de potencia en el transformador.

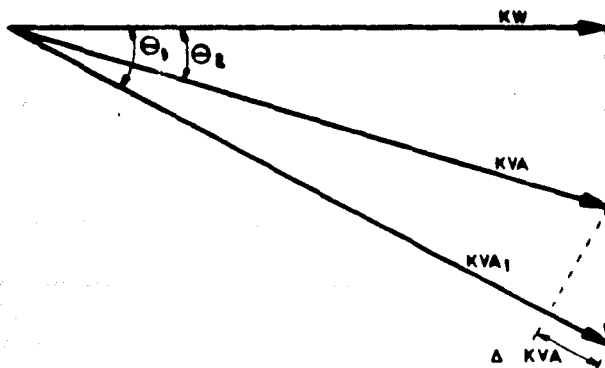


Fig. 1.6 Reducción de la Sobrecarga en la Capacidad de un Transformador.

Por otro lado si el transformador se encuentra sobrecargado se procederá a encontrar el f.p. necesario para que el transformador opere sin sobrecarga; para encontrar este f.p. ($\cos \theta_2$) primeramente obtendremos $\cos \theta_1$,

$$\cos \theta_1 = \frac{KW}{KVA + \Delta KVA} \quad 1.19$$

Donde:

ΔKVA = es el valor de sobrecarga, es decir, es la diferencia entre el consumo actual de potencia aparente y la capacidad nominal de los transformadores.

KVA = capacidad nominal de los transformadores

KW = consumo actual de potencia activa.

Ahora con θ_2 que es el que pretendemos lograr será .

$$\cos \theta_2 = \frac{KW}{KVA}$$

De la fig. 1.6 se puede obtener la siguiente relación trigonométrica:

$$KVAR = KW (tg \theta_1 - tg \theta_2) \quad 1.20$$

Y de esta última expresión se puede calcular los KVAR necesarios que los capacitores tendrán que suministrar para que el transformador no trabaje sobrecargado.

1.6 REDUCCION DE PERDIDAS POR EFECTO JOULE

Además de los beneficios mencionados anteriormente, la instalación de bancos de ca pacitores de potencia produce otro beneficio adicional: Es la reducción de pérdidas por efecto Joule, en los tramos de línea que van desde los generadores a los puntos - donde están instalados los capacitores.

En efecto, las pérdidas por calor producidas en las líneas provienen tanto de las corrientes activas como de las reactivas que circulan por las mismas y representan una energía perdida que el consumidor paga como si la hubiese transformado en trabajo - productivo. Llamando "P" a estas pérdidas y "R" a la resistencia ohmica total de -- una instalación industrial, se tiene:

$$P = R I_A^2 + R I_L^2 \quad 1.21$$

Teniendo en cuenta que $I^2 = I_A^2 + I_L^2$ esta expresión toma la forma:

$$P = R I^2 \quad 1.22$$

Vamos a llamar P_1 a las pérdidas correspondientes al factor de potencia $\cos \theta_1$ y P_2 a las pérdidas correspondientes al nuevo factor de potencia $\cos \theta_2$, obtenido - al instalar capacitores de potencia junto a las cargas que consumen potencia reactiva. Suponiendo que tanto la demanda de potencia activa, como el voltaje, no cambian - apreciablemente después de haberse instalado los capacitores, tendremos:

$$\begin{aligned} KW &= \sqrt{3} (KV) I_1 \cos \theta_1 \\ &= \sqrt{3} (KV) I_2 \cos \theta_2 \end{aligned} \quad 1.23$$

Expresión que nos relaciona las corrientes totales I_1 e I_2 antes y después de la instalación del banco, con los factores de potencia respectivos.

Llamando

$$- \Delta P = 100 \times \frac{P_1 - P_2}{P_1} \quad 1.24$$

Obtenemos finalmente

$$- \Delta P = 100 \left[1 - \left(\frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} \right)^2 \right] \% \quad 1.25$$

Expresión que nos da la disminución de pérdidas por efecto Joule, en tanto por ciento, obtenidas al mejorar el factor de potencia de un valor $\cos \theta_1$, al nuevo valor $\cos \theta_2$. Puede comprobarse que el paso de un factor de potencia del 70% al 85%, por ejemplo, produce una disminución de pérdidas por valor de más de 30%.

Este efecto es particularmente importante en las líneas de transmisión y distribución de energía eléctrica. Por razones económicas es conveniente que se mantenga constante la relación $\frac{P}{KW}$, independientemente de la potencia activa transportada.

Según la expresión

$$\frac{P}{KW} = \frac{R}{\sqrt{3}(KV)^2} \frac{KW}{\cos^2 \theta} \quad 1.26$$

(R: resistencia óhmica de la línea)

vemos que para que esto sea posible, es necesario que la relación $\frac{KW}{\cos^2 \theta}$ se mantenga constante.

Llamando $KW_{m\acute{a}x.}$ a la potencia activa transmitida cuando $\cos \theta = 1$ (máxima po

sible), se concluye que

$$KW = KW_{\text{máx.}} \cos^2 \theta \quad 1.27$$

Vemos pues, que siguiendo este criterio, la potencia activa transportable es proporcional al cuadrado del factor de potencia a que se efectúa la distribución. Para un factor $\cos \theta = 0.70$, la potencia transportable sería el 49% de la máxima posible; de donde se deduce la importancia del control del factor de potencia para lograr una distribución más económica.

C A P I T U L O I I

UBICACION DE CAPACITORES

Introducción

- 2.1 Descripción de bancos fijos y bancos desconectables
- 2.2 Método Schmill
- 2.3 Caídas de voltaje
- 2.4 Efectos de caída de voltaje
- 2.5 Método de control de voltaje
- 2.6 Regulación de voltaje

I N T R O D U C I O N

En este capítulo abordaremos el uso de bancos de capacitores fijos y desconectables, su aplicación a la reducción de pérdidas en alimentadores de distribución mediante una adecuada ubicación, se expondrá el método Schmill y el procedimiento de los números característicos, se verá un ejemplo de aplicación, para posteriormente hacer un análisis de las caídas de voltaje en alimentadores de distribución, sus efectos y el uso de capacitores para mejorar los niveles de voltaje, después se expone un método de control de voltaje y se ilustra un ejemplo de aplicación, para finalmente tratar la regulación de voltaje.

2.1 DESCRIPCION DE BANCOS FIJOS Y DESCONECTABLES

Se denominan bancos de capacitores fijos a aquellos que quedan conectados permanentemente a la línea y para los cuales no se proveen más que algunas operaciones de conexión y desconexión al año para su mantenimiento. Normalmente se conectan a la línea a través de cuchillas desconectadoras o cuchillas cortacircuito fusibles.

Los bancos se instalan permanentemente en las circunstancias siguientes: Cuando la

demanda la potencia reactiva de la carga que se pretende compensar es poco variable; cuando se pretende reducir pérdidas por efecto Joule, o bien aumentar la capacidad de carga de transformadores y generadores, conectándose una carga global poco variable; cuando se trata de elevar los niveles de voltaje en las líneas de transmisión y distribución.

Se denominan bancos de capacitores desconectables aquellos que están planeados para entrar y salir de operación frecuentemente, ya sea en forma automática o manual. Normalmente se operan por medio de desconectores diseñados especialmente para operar con cargas capacitivas puras, en algunas ocasiones se operan por medio de interruptores.

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

Los bancos de capacitores desconectables se instalan principalmente, bajo las siguientes circunstancias: Cuando se pretende compensar cargas fuertemente variables ya sea con la finalidad de corregir el factor de potencia, elevación de los niveles de voltaje, reducir pérdidas eléctricas o aumentar la capacidad de carga del sistema.

2.2 METODO SCHMILL

En esta sección se expone el método SCHMILL para la ubicación óptima de capacitores buscando una reducción de pérdidas.

Este método parte del siguiente problema: Dada la magnitud de un banco de capacitores, en que lugar deberá ser conectado al alimentador en forma permanente, para reducir al mínimo las pérdidas anuales resultantes.

Se han dado varias soluciones a este problema, tales como: Colocar los bancos de capacitores cerca de las cargas reactivas, colocar los capacitores a dos tercios de distancia de la carga, etc.; en fin que ninguna de estas soluciones es completamente adecuada por lo que se busca solucionar el problema de la siguiente manera:

Dado un circuito con "n" cargas como el que se ve en la fig. (2.1):

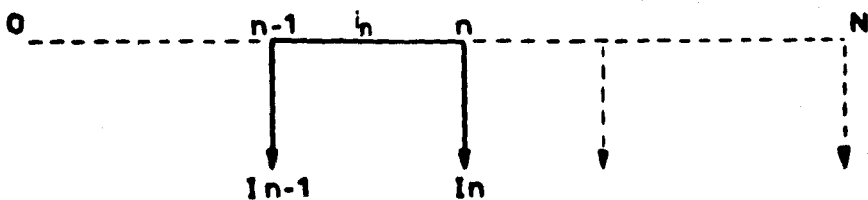


Fig. 2.1 Alimentador con "n" cargas distribuidas.

Tómese un tramo del alimentador entre los puntos n-1 y "n". Llámese a i_n a la corriente que circula por él, que es la suma:

$$i_n = \sum I_{ni} \quad (2.1)$$

De todas las cargas del alimentador, desde el punto "n" hasta el punto más lejano - "N". En general i_n es un número complejo que puede expresarse por:

$$i_n = i_{nr} + i_{ni} \quad (2.2)$$

La componente real i_{nr} es la necesaria para surtir la potencia requerida del alimentador, que es medida y por lo tanto facturada. La componente i_{ni} , inductiva, también produce pérdidas en el alimentador por efecto Joule, pero dicha componente puede ser compensada, parcial o totalmente por una corriente capacitiva y aún puede ser sobrecompensada si la corriente capacitiva es mayor. Para obtener las pérdidas mínimas deberá compensarse en forma total la componente inductiva. Esto evidentemente no es posible de lograr, por no existir en el mercado más que bancos de ciertas magnitudes fijas predeterminadas, y por la fluctuación de las cargas, pero pueden lograrse pérdidas anuales mínimas, reduciendo en cada tramo el valor absoluto de la corriente inductiva media anual.

Nótese que este principio es válido cualquiera que sea el calibre y la naturaleza del conductor empleado, es necesario hacer algunas suposiciones que simplifiquen la aplicación cuando no se conozca el factor de potencia y la variación individual de cada carga. Así, se supondrá un factor de potencia medio de duración para todas las cargas y una curva de duración media para las mismas.

Por medio de la red de distribución se saca un diagrama de recorrido simple del circuito que se va a estudiar, localizando las cargas que existen en ese circuito, las cargas de los ramales se suman y esta suma se concentra en el punto de donde se deri

va el ramal. Se numeran los puntos discretos de cada carga a lo largo del alimentador y se anotan las capacidades acumuladas de los transformadores de distribución o de las cargas industriales KVA_T , empezando por el principio del alimentador el cual se le asigna el punto 0. Es necesario conocer la corriente a la hora de demanda máxima $I_{m\acute{a}x}$, que se puede obtener por medición o como demanda futura pronosticada y C será la capacidad del banco de reactivos disponible.

Para calcular los KVAR demandados en cada punto utilizamos la siguiente expresión:

$$KVAR \text{ (demandados)} = KVA_T \sin \theta \times \frac{KVA_P}{KVA_T} \times \frac{KVA_D}{KVA_T} \quad (2.3)$$

$$\theta = \cos^{-1} (f.p.)$$

En donde los KVA_T son los KVA instalados en cada punto discreto de carga, $f.p.$ es un factor de potencia medio anual para todas las cargas, $\frac{KVA_P}{KVA_T}$ es el factor de utilización, es decir, los KVA de pico entre los KVA totales instalados al principio del alimentador, que también son igual a $\frac{\sqrt{3} E I_{m\acute{a}x}}{KVA_T}$; $\frac{KVA_D}{KVA_T}$ también llamado L_f es el factor de carga inductiva o sea KVA demandadas entre los KVA totales instalados, obtenidas las demandas de reactivos de cada carga obtendremos el diagrama de la fig. 2.2., en donde las q_i son las demandas de reactivos de cada una de las cargas.

Ahora para ubicar los bancos procedemos como sigue: Ubicamos el banco disponible en el primer punto de alimentador y hacemos la suma de flujo de reactivos en ese punto, considerando que los reactivos demandados por la carga son positivos, y los reactivos suministrados por el capacitor son negativos, aplicando la ley de corrientes de ---

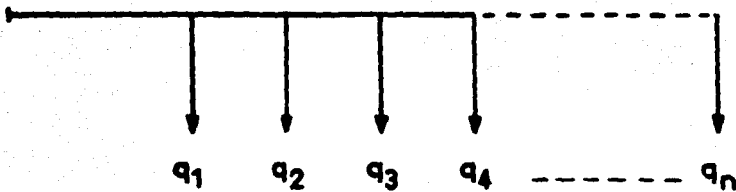


Fig. 2.2 Cargas reactivas de un alimentador.

Kirchhoff en este y cada uno de los puntos del alimentador, tendremos el flujo de reactivos en cada uno de los tramos del alimentador, para finalmente sumarlos y obtener el flujo total de reactivos que circulan por los restantes tramos. En la misma forma se procederá a ir localizando el banco en los demás puntos del alimentador, el punto óptimo de localización de este banco será aquel en el que la suma del flujo de reactivos sea mínimo.

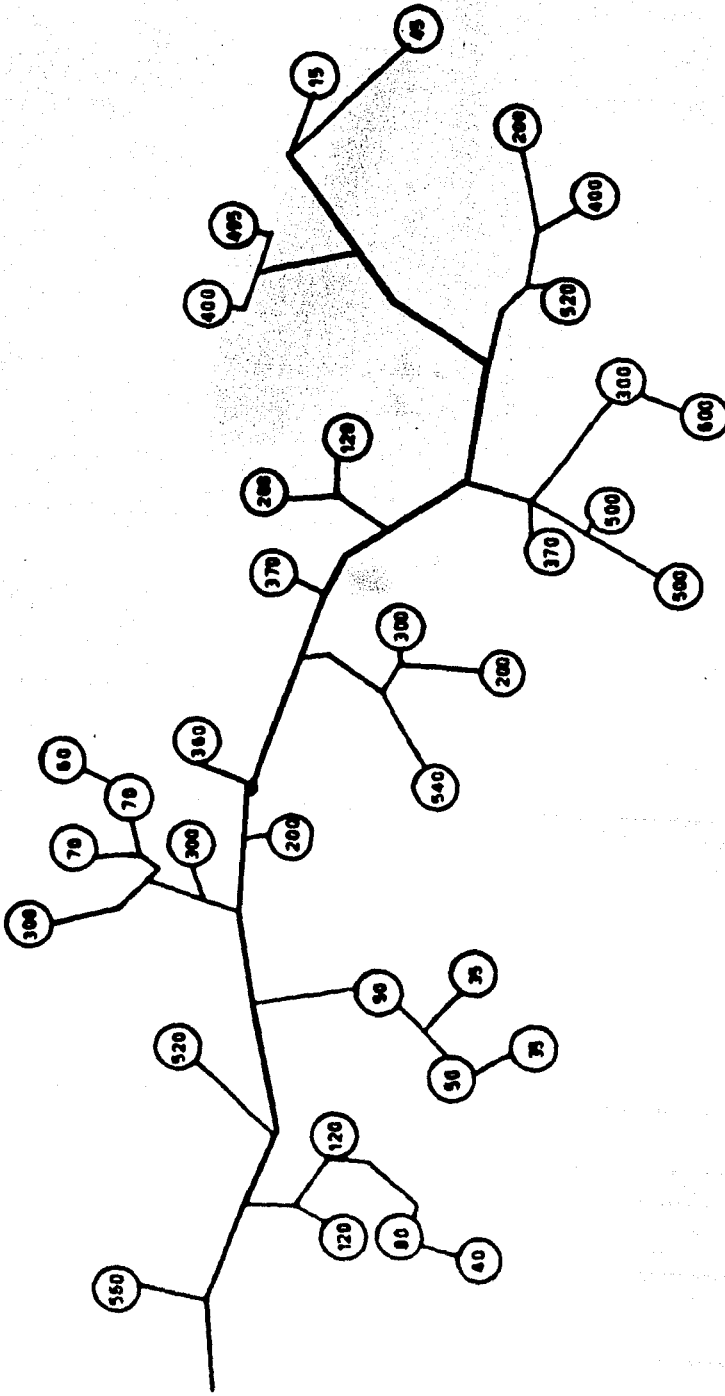


FIG.(2.3) CROQUIS DE LA RED DE DISTRIBUCION.

Para localizar el segundo banco de capacitores se procede de manera similar que en el caso del primer banco, pero con la diferencia que partimos del punto donde quedó ubicado el primer banco y además, considerando los efectos introducidos por éste. Los subsiguientes bancos se ubicarán de manera similar.

A continuación se expone un ejemplo que aclara el procedimiento descrito:

Se trata de un alimentador con 15 cargas, 13.2 KV, $I_{\text{máx}} = 343$, $L_f = 0.8$, $\text{f.p.} = 0.8$; donde los bancos disponibles a instalarse son de 900 KVAR, el croquis de la red de distribución se muestra en la fig. 2.3.

Obteniendo el diagrama simple de recorrido de las cargas discretas quedando ubicadas en la siguiente fig. 2.4.

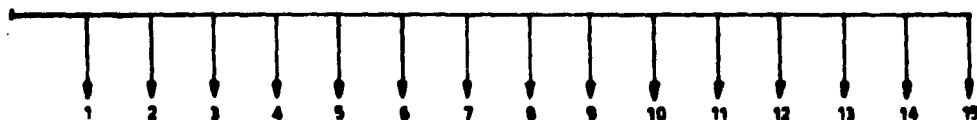


Fig. 2.4 Diagrama de cargas discretas.

Procedemos ahora a calcular los KVAR demandados en cada punto de acuerdo con la expresión 2.3 estos valores se muestran en la columna 3 de la tabla No. 2.1.

Punto No.	KVA	KVAR	KVAR por carga
0	8960	3764.7	
1	8960	3764.7	235.3
2	8400	3329.4	151.2
3	8040	3378.2	218.2
4	7520	3160.0	71.8
5	7350	3088.2	336.2
6	6550	2752.0	84.0
7	6350	2668.0	151.0
8	5990	2517.0	437.0
9	4950	2080.0	155.6
10	4580	1924.4	134.4
11	4260	1790.0	911.84
12	2090	878.16	470.6
13	970	407.56	376.06
14	75	31.5	18.9
15	30	12.6	12.6

TABLA 2.1

Ahora procedemos a localizar el primer banco de capacitores (C_1) de 900 KVAR, sobre cada una de las cargas o puntos; empezando por el final del alimentador, por el punto 15 se calcula el flujo de KVAR en cada una de las secciones del alimentador, en la misma forma se procederá a ir localizando C_1 en los puntos restantes. - El punto óptimo de localización será aquel en el que la suma del flujo de reactivos - a todo lo largo del alimentador sea mínimo, se encuentra que este punto es el 12.

Para localizar el segundo banco de capacitores se realiza de la misma manera con la diferencia de que se empieza localizándolo después del punto donde fué localizado el banco anterior hacia el generador. En la misma forma se localizan los subsecuentes bancos.

La tabla 2.2 nos ilustra los flujos de reactivos y de ella obtenemos que los puntos -- óptimos son 12, 11, 8 y 4.

TABLA 2.2

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
																	Σ
Carga (KVAR)	235.3	151.2	218.2	71.8	336.2	84.0	151.0	437.0	198.6	134.4	911.84	470.8	378.06	18.9	12.6	3764.7	
Flujos de reactivos en KVAR, con y sin la instalación del banco de capacitores C_1																	
sin C_1	3764.7	3529.4	3378.2	3160.0	3008.2	2752.0	2668.0	2517.0	2080.0	1976.4	1790.0	878.16	407.55	31.5	12.6	35746.42	
C_1 en 15	2864.7	2629.4	2478.2	2280.0	2188.2	1852.0	1768.0	1617.0	1180.0	1024.4	890.0	21.84	492.44	868.5	887.4	23021.38	
C_1 en 14	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	492.44	868.5	12.6	22146.68	
C_1 en 13	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	492.44	31.5	12.6	21309.58	
C_1 en 12	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	407.56	31.5	12.6	21224.7	

T A B L A 2.2 (Continuación)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
																	Σ
Carga (kVAR)	295.3	151.2	218.2	71.8	336.2	84.0	151.0	437.0	156.6	134.4	911.04	470.6	376.06	18.9	12.6	3764.7	
Flujos de reactivos en kVAR debidos a la instalación de los bancos de capacitores C_1 y C_2																	
C_1 en 12	2864.7	2629.4	2478.2	2260.0	2188.2	1852.0	1768.0	1617.0	1180.0	1024.4	890.0	21.84	407.56	31.5	12.6	21224.7	
C_2 en 11	1964.7	1729.4	1578.2	1360.0	1288.2	952.0	868.0	717.0	280.0	124.4	10.0	21.84	407.56	31.5	12.6	11345.4	
C_2 en 10	"	"	"	"	"	"	"	"	280.0	124.4	890.0	21.84	407.56	31.5	12.6	12225.4	
C_2 en 9	"	"	"	"	"	"	"	"	280.0	1024.4	890.0	21.84	407.56	31.5	12.6	13125.4	
C_2 en 8	"	"	"	"	"	"	"	"	1180.0	1024.4	890.0	21.84	407.56	31.5	12.6	15049.8	

TABLA 2.2 (Continuación)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
																	Σ
Carga (KVAR)	235.3	151.2	218.2	71.8	336.2	84.0	151.0	437.0	155.6	134.4	911.84	470.6	376.06	18.9	12.6	3764.7	
Flujo de reactivos en KVAR debidos a la instalación de los bancos de capacitores C_2 y C_3																	
C_2 en 11	1964.7	1779.4	1578.2	1360.0	1288.2	952.0	868.0	717.0	280.0	124.4	10.0	21.84	407.56	31.5	12.6	11345.4	
C_3 en 10	1884.7	826.4	878.2	460.0	368.2	52.0	32.0	183.0	620.0	775.6	10.0	21.84	407.56	31.5	12.6	5566.6	
C_3 en 9	"	"	"	"	"	"	"	183.0	620.0	124.4	10.0	21.84	407.56	31.5	12.6	4915.4	
C_3 en 8	"	"	"	"	"	"	"	183.0	280.0	124.4	10.0	21.84	407.56	31.5	12.6	4575.4	
C_3 en 7	"	"	"	"	"	"	"	717.0	280.0	124.4	10.0	21.84	407.56	31.5	12.6	5109.4	

T A B L A 2.2 (Continuación)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
																	Σ
Carga (KVAR)	235.3	151.2	218.2	71.8	336.2	84.0	151.0	407.0	155.6	134.4	911.84	470.6	376.06	18.9	12.6	3764.7	
Flujo de reactivos en KVAR debidos a la instalación de los bancos de capacitores C ₃ y C ₄																	
C ₃ en 2	1064.7	829.4	678.2	460.0	388.2	52.0	32.0	183.0	280.0	124.4	10.0	21.84	407.56	31.5	12.6	4675.4	
C ₄ en 7	164.7	70.6	221.8	440.0	511.8	848.0	932.0	183.0	280.0	124.4	10.0	21.84	407.56	31.5	12.6	5156.4	
C ₄ en 5	"	"	"	"	511.8	848.0	32.0	183.0	280.0	124.4	10.0	21.84	407.56	31.5	12.6	3359.8	
C ₄ en 5	"	"	"	"	511.8	52.0	32.0	183.0	280.0	124.4	10.0	21.84	407.56	31.5	12.6	2563.8	
C ₄ en 4	"	"	"	"	388.2	52.0	32.0	183.0	280.0	124.4	10.0	21.84	407.56	31.5	12.6	2440.2	

a) Números Característicos.

Un procedimiento más práctico para ubicar los bancos de capacitores es utilizar los números característicos: Este método ubica los bancos de capacitores en los mismos puntos en los que quedarían ubicados si se utilizara el método de flujo de reactivos; los números característicos son:

$$C_{I} = 0.5 C_1$$

$$C_{II} = C_1 + 0.5 C_2$$

$$C_{III} = C_1 + C_2 + 0.5 C_3$$

Donde $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ son las capacidades de los bancos disponibles.

Cuando los bancos son de una misma capacidad estos números característicos se reducen a:

$$C_I = 0.5 C$$

$$C_{II} = 1.5 C$$

$$C_{III} = 2.5 C$$

Estos números característicos se utilizan en la siguiente forma:

El primer banco se ubicará donde la carga total acumulada en KVAR sea igual o su

terior a 0.5 de C. El segundo banco se ubicará donde la carga total sea igual o superior a 1.5 veces el valor de C. y así de esta manera se irán utilizando los demás números característicos para ubicar todo los bancos necesarios.

Ahora ubicaremos los bancos de capacitores del ejemplo anterior utilizando los números característicos:

Como disponemos de bancos de 900 KVAR, entonces:

$$C_1 = C_2 = C_3 = 900 \text{ KVAR}$$

Por lo que:

C_I	=	0.5 C = (0.5)	900 = 450 KVAR	punto 12
C_{II}	=	1.5 C = (1.5)	900 = 1350 KVAR	punto 11
C_{III}	=	2.5 C = (2.5)	900 = 2250 KVAR	punto 8
C_{IV}	=	3.5 C = (3.5)	900 = 3150 KVAR	punto 4

Que era lo que se esperaba.

Bancos Desconectables

Cuando la curva de carga diaria es conocida y además los requerimientos para baja carga se han cubierto, inmediatamente se procede a ubicar capacitores desconectables para satisfacer las condiciones de carga máxima.

Existen varios tipos de controles para conectar y desconectar los capacitores en derivación, siendo los más comunes los siguientes:

- a). Control de tiempo
- b). Control de Voltaje
- c). Control de corriente
- d). Control de temperatura
- e). Control de potencia reactiva.

Una combinación de estos es usada para seguir lo más cerca posible la curva de demanda diaria.

Para la localización de bancos desconectables ó bancos controlados, es necesario - calcular una capacidad equivalente (C_e) del banco o los bancos que se desean instalar. Para el cálculo de C_e se tiene la siguiente relación:

$$C_e = \frac{(KVA_T) \text{sen} \theta}{KVAR_F + KVAR_D} \times KVAR_C \quad (2.4)$$

Donde:

KVA_T - Carga total instalada en el alimentador.

$\text{sen} \theta$ - Valor del $\text{sen} \theta$ donde $\text{cos} \theta$ es el f.p. promedio a la hora que operan estos bancos.

$KVAR_C$ - Capacidad del capacitor desconectable a instalar.

$KVAR_F$ - Total de los capacitores fijos ya instalados.

$KVAR_D$ - Total de los capacitores del 1er. grupo de bancos desconectables.

Una vez obtenido el valor de la capacidad equivalente del banco o los bancos a instalarse se procede a multiplicarse este valor por los números característicos ya con

cidas (0.5, 1.5, 2.5, ... etc); dependiendo del número de bancos que se desean-
instalar, será la cantidad de valores característicos que se tengan.

$$\begin{aligned}
 C_{e_1} &= 0.5 C_e \\
 C_{e_2} &= 1.5 C_e \\
 C_{e_3} &= 2.5 C_e \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 C_{e_n} &= (n-0.5) C_e
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

Donde n es el número de bancos desconectables a instalarse en el primer grupo.

Los siguientes pasos se complementan con el uso de una tabla que contenga las co-
lumnas siguientes:

Columna No. 1 - Numeración progresiva de los lugares donde existen las cargas.

Columna No. 2 - Demanda de cada una de las cargas en KVA.

Columna No. 3 - Factor de potencia promedio de cada una de las cargas.

Columna No. 4 - Demanda de KVAR de cada una de las cargas, considerando -
que toda la carga esta trabajando y operando con el f.p. me-
dio correspondiente, o sea:

$$KVAR = KVA \times \text{sen } \theta$$

Donde:

KVA - es el valor de la carga instalada.

sen θ - Valor sen θ donde θ es el ángulo cuyo
cos θ es el f.p. medio anual.

KVAR - demanda de la carga en KVAR

Columna No. 5 - KVAR acumulados. Esta será la suma progresiva de las cargas en KVAR, partiendo del extremo final del alimentador, en esta columna se escribirá una (F) en los puntos donde se encuentre ubicado un banco fijo.

Columna No. 6 - Esta columna empieza llenándose de abajo hacia arriba, teniendo inicialmente los mismos valores que en la columna anterior (Col. 5), pero al llegar al primer renglón que contenga una (F) debemos restar al valor de la columna 5 de este mismo renglón la cantidad calculada con la fórmula (2.4). Para seguir llenando columna No. 6 sumamos al valor hallado en la primera (F) el valor del renglón siguiente de la columna 4, hasta encontrar la segunda (F); a esta cantidad se le resta dos veces el valor calculado con la fórmula 2.4, luego de hacer la resta al resultado se le sigue acumulando los KVAR de la columna 4, hasta hallar la tercera (F), a este valor se le resta tres veces el valor calculado con la fórmula 2.4 y así sucesivamente se continúa llenando la columna 6.

Los bancos desconectables deberán colocarse localizando el valor más cercano a los valores encontrados en 2.5, de preferencia el valor inmediato superior, estos puntos serán marcados con una letra (D) que significa que son bancos desconectables.

Para fijar los puntos, donde se instalará el segundo grupo de bancos desconectables, se procede de la siguiente manera:

Con la fórmula 2.4, donde ahora los KVAR medidos son igual a

$$\text{KVAR}_{\text{medidos}} = \text{KVAR}_F + \text{KVAR}_{(\text{Desc. 1er. grupo})} + \text{KVAR}_{(\text{Desc. 2do. Grupo})}$$

El valor de KVAR_e debe multiplicarse por los números característicos de manera similar que para el primer grupo.

Se procede a formar la columna 7 de manera similar a la construcción de la columna 6 con la diferencia de que las restas se realizarán en los puntos donde se encuentre una (F) ó una (D).

Aplicando este procedimiento al ejemplo anterior, tendremos que los bancos desconectables quedan ubicados en los puntos 13 y 7.

2.3 CAIDAS DE VOLTAJE

Las caídas de voltaje se deben al flujo de corrientes a través de una impedancia; para el cálculo de la caída de voltaje se requiere conocer la impedancia, la corriente del circuito y el factor de potencia entre la corriente y el voltaje; en este análisis el factor de potencia será el de la carga.

Los métodos rigurosos del cálculo de caídas de voltaje, son muy complicados, particularmente en los casos donde el voltaje del generador es conocido y la corriente junto con el f.p. de la carga varían al variar el voltaje receptor. Para propósitos prácticos los métodos aproximados son generalmente satisfactorios.

Existen dos métodos para determinar las caídas de voltaje. El primero utiliza ya sea el voltaje del generador o el voltaje receptor, la magnitud y el factor de potencia de la corriente en el circuito. El segundo método involucra el uso de curvas de caída de voltaje, este segundo método no será tratado en este estudio.

La caída de voltaje en un sistema de potencia puede ser calculada mediante la selección de la fórmula que proporcione la exactitud deseada y para lo cual se debe conocer el voltaje del generador, o bien el voltaje receptor del circuito.

En la fig. (2.5) se muestra un diagrama vectorial que relaciona el voltaje del generador y el voltaje receptor con la caída del voltaje y el factor de potencia, a partir de este diagrama se hace la deducción de la fórmula para el cálculo de las caídas de voltaje. La nomenclatura de la fig. 2.5 se presenta al final de esta sección.

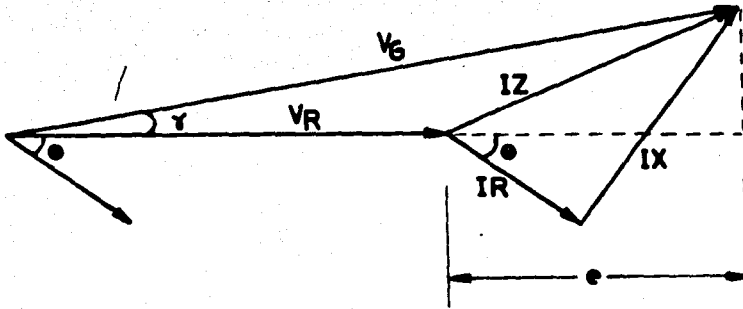


Fig. 2.5 Diagrama vectorial que indica la caída de voltaje.

De la fig. (2.5) tenemos que :

$$\vec{V}_G = \vec{V}_R + \vec{IZ} \quad (2.6)$$

Se sabe también que :

$$V_G^2 = (V_R + IR \cos \theta + IX \sin \theta)^2 + (IX \cos \theta - IR \sin \theta)^2 \quad (2.7)$$

Sustituyendo (2.6) en (2.7)

$$(V_R + IZ)^2 = (V_R + IR \cos \theta + IX \sin \theta)^2 + (IX \cos \theta - IR \sin \theta)^2 \quad 2.7b$$

Extrayendo raíz cuadrada en ambos miembros y despejando la caída IZ:

$$IZ = \sqrt{(V_R + IR \cos \theta + IX \sin \theta)^2 + (IX \cos \theta - IR \sin \theta)^2} - V_R \quad (2.8)$$

Con esta expresión se obtiene la caída de voltaje IZ, conocido el voltaje receptor V_R

Por otro lado si se obtiene el valor de V_R de la ecuación 2.6 y se substituye en 2.7b nos conduce a la siguiente ecuación:

$$V_G^2 = (V_G - IZ + IR\cos\theta + IX\sin\theta)^2 + (IX\cos\theta - IR\sin\theta)^2 \dots (2.9)$$

Extrayendo raíz cuadrada en ambos miembros y despejando la caída de voltaje IZ obtendremos:

$$IZ = V_G + IR\cos\theta + IX\sin\theta - \sqrt{V_G^2 - (IX\cos\theta - IR\sin\theta)^2} \quad (2.10)$$

Con esta expresión obtenemos la caída de voltaje IZ conocido el voltaje en el extremo generador. Las fórmulas (2.8) y (2.10) nos proporcionan el valor de la caída en forma exacta. En casos prácticos las fórmulas aproximadas son lo suficientemente precisas cuando V_G o V_R es conocido, entonces tenemos que:

$$\text{Caída de voltaje al neutro} = I (R\cos\theta + X\sin\theta) \quad (2.11)$$

$$\text{Caída de voltaje entre líneas} = \sqrt{3}I (R\cos\theta + X\sin\theta) \quad (2.12)$$

A partir de la ecuación (2.11) se puede calcular el porciento de caída de voltaje.

$$\% \text{ Caída de voltaje} = \frac{\text{Caída de voltaje}}{\text{Voltaje del generador}} \times 100 \quad (2.13)$$

$$= \frac{\sqrt{3} (R\cos\theta + X\sin\theta)}{KV} \times 100 \quad (2.14)$$

y dado que:

$$I = \frac{KVA}{\sqrt{3} KV}$$

Sustituyendo el valor de la corriente I en la ec. 2.14, tenemos que:

$$\% \text{ Caída} = \frac{KVA (R\cos\theta + X\sin\theta)}{10 KV^2} \quad (2.15)$$

Donde KVA es la potencia trifásica y KV son los kilovolts entre líneas.

Nomenclatura de la caída de voltaje :

V_G = Voltaje del generador al neutro

V_R = Voltaje receptor al neutro

θ = Angulo cuyo coseno es el factor de potencia de la carga

I = Corriente de línea.

R = Resistencia del circuito (Ω)

X = Reactancia inductiva del circuito (Ω)

Por convención la reactancia inductiva es positiva y la reactancia capacitiva es negativa (despreciada).

2.4 EFFECTOS DE LA CAIDA DE VOLTAJE

Las caídas en los tramos de un alimentador ocasionan que los niveles de voltaje en los diferentes puntos de este bajen ostensiblemente con respecto al voltaje nominal, este problema se acentúa más en aquellos alimentadores que tienen longitudes muy grandes, siendo las cargas que se encuentran ubicadas al final del alimentador las más afectadas por tener los niveles más bajos. Los problemas que se acarrearán como consecuencia de unos niveles bajos de voltaje repercuten directamente sobre el funcionamiento de los aparatos que constituyen las cargas, siendo los más afectados los motores de inducción, pues estos sufren un calentamiento excesivo lo que acorta su período de vida útil, y además provoca que el par proporcionado disminuya, los motores síncronos también son afectados ocasionándose que su velocidad síncrona varíe; otros dispositivos afectados son las lámparas de filamento incandescente, las lámparas fluorescentes, los dispositivos que utilizan solenoides y en general todos los dispositivos electrónicos.

Lo expuesto anteriormente hace evidente reducir hasta donde sea conveniente desde el punto de vista económico y técnico las caídas de voltaje en los tramos de un alimentador.

Para mostrar los efectos de caída de voltaje, considérese por ejemplo el circuito de la fig. 2.6 a y su correspondiente gráfica de variación de voltaje fig. 2.6b.

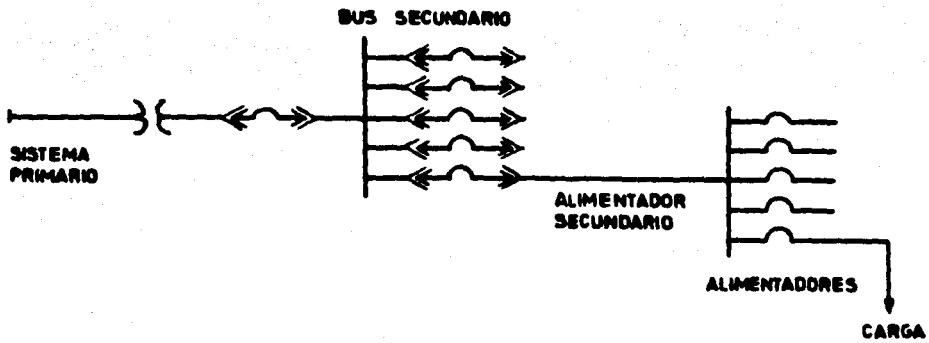


Fig. 2.6.a. Diagrama unifilar de un sistema eléctrico de potencia, por ejemplo - una planta industrial.

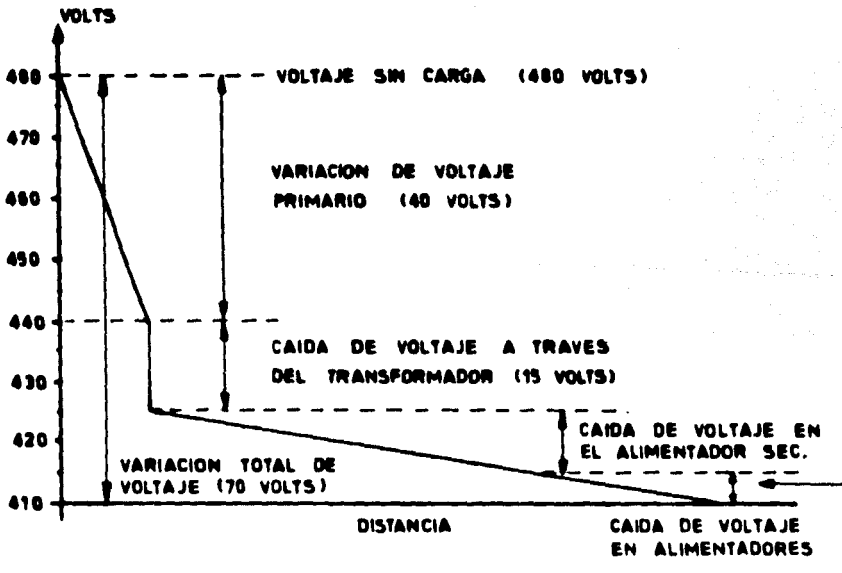


Fig. 2.6.b. Condiciones de voltaje a plena carga para el circuito de la - - - - Fig. 2.6.a. con gran variación de voltaje primario (40 volts en 480 volts). El voltaje primario varía de un valor máximo sin carga a un valor mínimo a plena carga.

Elevación de los niveles de voltaje por medio de capacitores.

Como se vió anteriormente, por medio de la fórmula (2.11) se calcula en forma aproximada la caída de voltaje en alimentadores de distribución o líneas cortas, esta misma ecuación se puede escribir de la siguiente manera:

$$e = R I_r + X I_x \quad (2.16)$$

Donde "e" es la caída de voltaje, R la resistencia, X la reactancia, I_r la componente real de la corriente, e I_x la componente reactiva, como se muestra en la fig. (2.7).

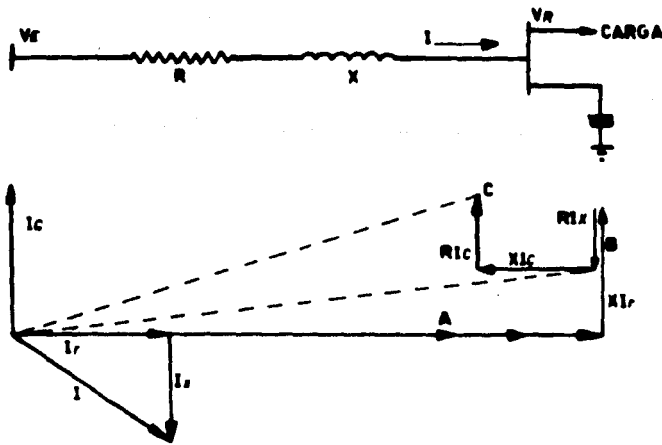


Fig. (2.7) efecto de los capacitores en derivación sobre la caída de voltaje en un circuito.

OA = Voltaje en la carga V_R

OB = Voltaje del generador sin capacitores V_G

OC = Voltaje del generador con capacitores V_G

De la ecuación 2.16 es evidente que la corriente reactiva opera únicamente sobre la reactancia del circuito, y puesto que los capacitores instalados en derivación reducen la corriente reactiva, la caída de voltaje se reduce una cantidad igual a la corriente del capacitor multiplicada por la reactancia, es decir, la nueva caída de voltaje al instalar los capacitores será:

$$e = R I_r + X I_x - X I_c \quad (2.17)$$

Donde:

I_c = corriente del capacitor

Por lo tanto, para predecir el cambio de caída de voltaje debido a la instalación de capacitores, únicamente es necesario conocer la potencia nominal del banco de capacitores y la reactancia del sistema.

De la ecuación (2.16) también se ve que la caída de voltaje está compuesta de dos partes, una parte debida a la corriente real y resistencia, que es usualmente llamada componente resistiva y la otra parte debida a la corriente reactiva y reactancia - conocida como componente reactiva.

En sistemas de potencia industriales la reactancia es frecuentemente mucho mayor -- que la resistencia, del orden de dos a cuatro veces para circuitos de distribución y de cinco a diez veces para transformadores de potencia. Es evidente que una variación

en la corriente reactiva tiene mayor efecto que la corriente real en la reducción de la caída de voltaje total. Dado que la componente resistiva es fija (dada la carga en KW), y la reactancia del circuito también lo es, la forma práctica de reducir la caída del voltaje es reduciendo la corriente reactiva. La corriente reactiva se reduce cuando el factor de potencia es mejorado.

Por ejemplo, si un circuito tiene una resistencia de 1% una reactancia de 5% y un factor de potencia de 0.7 la caída de voltaje es de 4.3%. La mayor parte de la caída se debe a la reactancia, correspondiendo un 3.6%. Si el factor de potencia se incrementa a 0.9 la caída de voltaje es 2.4% y si se incrementa a la unidad, la caída de voltaje es únicamente 0.7%.

Existen varias formas para determinar la elevación de voltaje ocasionada por la introducción de los capacitores, siendo el método del porcentaje de elevación de voltaje -- (%V_c) el más simple; éste se deduce de la siguiente manera:

De la ecuación (2.17) se ve que la reducción de la caída viene dada por:

$$V_c = I_c X \quad (2.18)$$

$$I_c = \frac{KVAR}{\sqrt{3} KV} \quad (2.19)$$

Definiendo el porcentaje de aumento de voltaje como:

$$\% V_c = \frac{V_c}{KV} \quad (2.20)$$

Donde:

% V_c = porcentaje de aumento de voltaje debido a la instalación de bancos de capacitores.

V_c = caída de voltaje al neutro

KV = Voltaje de operación entre fases

Sustituyendo 2.18 y 2.19 en 2.20 tenemos:

$$\% V_c = \frac{KVAR}{\sqrt{3} KV} \times \frac{X}{KV} \times 100 \quad (2.21)$$

Y finalmente el porcentaje de aumento de voltaje es:

$$\% V_c = \frac{KVAR \times X}{10 KV^2} \quad (2.22)$$

Así, la ec. 2.22 determina el porcentaje de aumento de voltaje conociendo la potencia nominal del capacitor (KVAR), la reactancia de la línea (X) de la sección en que se desea conocer %Vc y el voltaje de operación (KV).

2.5 METODO DE CONTROL DE VOLTAJE

La calidad del servicio de energía eléctrica entregada a los usuarios se determina por la continuidad del servicio, la frecuencia y un control de voltaje adecuado, el método que aquí se expone persigue este último, objetivo utilizando una combinación de capacitores fijos y desconectables sobre alimentadores de distribución, para evitar hasta donde sea posible el uso de derivaciones de los transformadores de distribución. La cantidad de capacitores fijos se determina de acuerdo a las condiciones del alimentador para baja carga y los capacitores desconectables se determinan de acuerdo a las condiciones del alimentador para carga pico. El control de tiempo de calibración para los capacitores desconectables proporciona un control de voltaje óptimo para las variaciones de una carga diaria.

El primer paso de este método es aplicar capacitores fijos al final del circuito del alimentador, o directamente en los puntos donde las cargas son grandes. Una unidad fija hace la misma función que las derivaciones de los transformadores de distribución es decir fijar el nivel de voltaje. El hecho de utilizar capacitores fijos no implica una minimización de kilovars en el circuito.

El segundo paso es aplicar capacitores desconectables sobre el alimentador de distribución para elevar sus niveles de voltaje y proporcionar los KVAR requeridos por la carga.

Para localizar los capacitores primero se grafican los niveles de voltaje para las condiciones de baja y alta carga del circuito.

a) Capacitores fijos para condiciones de baja carga.

Para una carga uniformemente distribuida sobre el circuito los capacitores fijos se colocaran más allá del 80% de la longitud de éste, partiendo desde la subestación, de preferencia al final del alimentador.

Si los capacitores son colocados más allá del 80% de la longitud las pérdidas para condiciones de baja carga no se incrementarán en forma significativa. La ubicación puede ser modificada levemente de acuerdo a la posición de las cargas. En la ubicación de capacitores fijos se tomarán en cuenta las tres restricciones siguientes:

1. El tamaño del capacitor que se ubique no producirá un adelanto en el factor de potencia.
2. A ninguno de los puntos del circuito se le permitirá exceder el voltaje nominal.
3. Un banco de capacitores fijo no elevará el voltaje en más de un 7%.

Los nuevos voltajes en el alimentador se grafican para mostrar el efecto de los capacitores fijos; si los niveles de voltaje no pueden ser ajustados dentro de los límites prescritos (una variación de 0 a 10% abajo del voltaje nominal), o no se puede obtener un factor de potencia cercano a la unidad se puede deber a las siguientes causas:

1. El voltaje del sistema no se encuentra dentro de los límites adecuados.
2. Las características de la carga no cumplen con las normas establecidas.
3. Los estudios de las condiciones de carga pico revelan un alimentador sobrecargado.

b) **Capacitores desconectables para las condiciones de carga pico.**

Cuando las condiciones de baja carga han sido satisfechas dentro de los límites establecidos se procede a graficar el voltaje para las condiciones de carga pico. Si para cualquier punto es menor en un 10% del voltaje nominal se procede a calcular el tamaño del nuevo banco de capacitores necesarios para elevar los niveles de voltaje hasta unos valores adecuados.

Los capacitores desconectables son colocados por lo menos más allá de donde se obtiene el punto mínimo de voltaje.

Si se requiere más de un banco de capacitores desconectables se procede de la misma manera, es decir se vuelven a graficar los niveles de voltaje que se obtuvieron con el primer banco y así sucesivamente para los subsecuentes bancos, colocando cada capacitor más allá de donde se obtuvo el punto mínimo de voltaje puesto el banco anterior. El procedimiento queda concluido cuando todos los niveles de voltaje están dentro del margen de variación preestablecido.

Es necesario investigar algunas características del alimentador después de haber determinado la cantidad y ubicación de bancos desconectables tales como: el factor de potencia, este no debe exceder el 80% de adelanto, si se ha excedido el 80% de adelanto del f.p. del circuito es porque quizá el alimentador esté sobrecargado de capacitores o porque el nivel de voltaje del bus de entrada es muy bajo, cuando tenemos la carga pico con todos los capacitores en servicio el voltaje del alimentador no debe ser inferior en un 10% del voltaje nominal.

EJEMPLO DE APLICACION

Para ilustrar como se mejoran los niveles de voltaje por medio de capacitores se procederá a analizar un ejemplo con los datos que a continuación se dan.

Carga pico	8960 KVA
* Factor de potencia a carga pico (f.p.)	80 %
L. F. (factor a baja carga)	30 %
Baja Carga	2688 KVA
Factor de potencia a baja carga (f.p.)	80 %
Voltaje de operación	13.2 KV

La fig. 2.4 muestra el diagrama simple de recorrido del alimentador y en la tabla 2.1 sus cargas (KVA y KVAR) concentradas en 15 puntos.

La solución del problema se divide en tres partes

1. La obtención de las curvas de caída de voltaje del alimentador, tanto para con condiciones de baja carga como para carga pico que están basadas en el uso de la fórmula de caída de voltaje. Por ejemplo para la sección G entre los puntos 6 y 7:

$$\text{KVA} = 1905 \text{ (acumulados)}$$

$$d = 1 \text{ Km}$$

$$R = 0.143 \text{ ohms/km}$$

$$x = 0.426 \text{ ohms/km}$$

- * Después de haberse corregido el (f.p.) a baja carga.

$$\cos \theta = 0.8$$

$$\text{sen } \theta = 0.6$$

$$KV = 13.2$$

$$\begin{aligned} \% \text{ caída} &= \frac{1905 \times 1(0.143 \times 0.8 + 0.426 \times 0.6)}{10 \times (13.2)^2} \\ &= 0.4046 \end{aligned}$$

De la misma manera se calculan todas las caídas en las otras secciones del circuito y los resultados obtenidos pueden tabularse en la tabla No. 3.

2. Para la elevación de los niveles de voltaje en condiciones de baja carga se utilizan dos bancos de capacitores fijos, de 1350 y 300 KVAR en los puntos 11 y 5 respectivamente; se utilizan estos tamaños de bancos por disponerse de ellos, -- además porque se requiere una compensación para las condiciones de baja carga de 1612 KVAR, estos se colocan en los puntos mencionados dado que allí se solicitan grandes cantidades de reactivos.
3. Para la elevación de los niveles de voltaje en condiciones de carga pico se utilizan tres bancos de capacitores desconectables, uno de 1,350 KVAR en el punto 10, uno de 1,350 KVAR en el punto 12, y finalmente uno de 900 KVAR en el mismo punto.

Con esta cantidad de KVAR desconectables (con los fijos ya instalados) se satisface la demanda de reactivos para las condiciones de carga pico, la ubicación y el tamaño de estos bancos desconectables persiguen mejorar todos los niveles de voltaje para

que queden dentro de un margen de variación preestablecido.

Ahora bien, para calcular el aumento de voltaje de un punto del alimentador con respecto a otro anterior debido a la introducción de los capacitores utilizamos la fórmula 2.22, por ejemplo para calcular el porcentaje de elevación de voltaje a baja carga para el punto 7 con respecto al 6 (sección G).

$$KVAR = 1350$$

$$X = 0.426 \text{ ohms / km}$$

$$d = 1 \text{ km}$$

$$KV = 13.2$$

$$\%V_c = \frac{1350 \times 0.426 \times 1}{10 \times (13.2)^2}$$

Por lo tanto, el nuevo porcentaje de caída en este tramo es:

$$0.404 - 0.33 = 0.074 \%$$

De la misma manera calculamos la elevación de voltaje de cada punto con respecto al anterior y las nuevas caídas de voltaje para baja carga y carga pico debidas a la introducción de capacitores se dan en la tabla No. 4.

En las gráficas que se muestran a continuación se dan las curvas de los valores tabulados en las tablas 3 y 4.

SECCION	KVA (acumulados)		PORCIENTO DE CAIDA DE VOLTAJE	
	C. PICO	B. CARGA	C. PICO	B. CARGA
A	8960	2688	1.902	0.5707
B	8400	2520	1.783	0.5351
C	8040	2412	1.707	0.5121
D	7520	2256	1.596	0.4790
E	7350	2205	1.560	0.4682
F	6550	1965	1.390	0.4172
G	6350	1905	1.348	0.4045
H	5990	1797	1.271	0.3815
I	4950	1485	1.051	0.3153
J	4580	1374	0.972	0.2917
K	4260	1278	0.904	0.2713
L	2090	627	0.443	0.1331
M	970	291	0.205	0.0617
N	75	22.5	0.015	0.0047
O	30	9	0.006	0.0019
Porciento de carga acumulada al final del alimentador			16.270	4.8480

TABLA No. 3

SECCION	KVAR CAPACITIVOS (acumulados)		PORCIENTO DE ELE- VACION DE VOLTAJE		PORCIENTO DE CAIDA TOTAL	
	C. PICO	B. CARGA	C. PICO	B. CARGA	C. PICO	B. CARGA
A	5250	1650	169.43	53.25	0.6149	0.1675
B	5250	1650	169.43	53.25	0.4962	0.1316
C	5250	1650	169.43	53.25	0.4200	0.1086
D	5250	1650	169.43	53.25	0.3098	0.0755
E	5250	1650	169.43	53.25	0.2738	0.0647
F	4950	1350	159.75	43.56	0.1776	0.0871
G	4950	1350	159.75	43.56	0.1353	0.0744
H	4950	1350	159.75	43.56	0.0590	0.0514
I	4950	1350	159.75	43.56	0.1613	0.0147
J	4950	1350	159.75	43.56	0.2397	-0.0383
K	3600	1350	116.18	43.56	0.0226	-0.0587
L	2250	-	72.61	-	-0.1073	0.1331
M	-	-	-	-	0.2055	0.0617
N	-	-	-	-	0.0158	0.0047
O	-	-	-	-	0.0063	0.0019

Porciento de caída de voltaje acumulada

al final del alimentador con capacitores

2.2783

0.894

TABLA No. 4

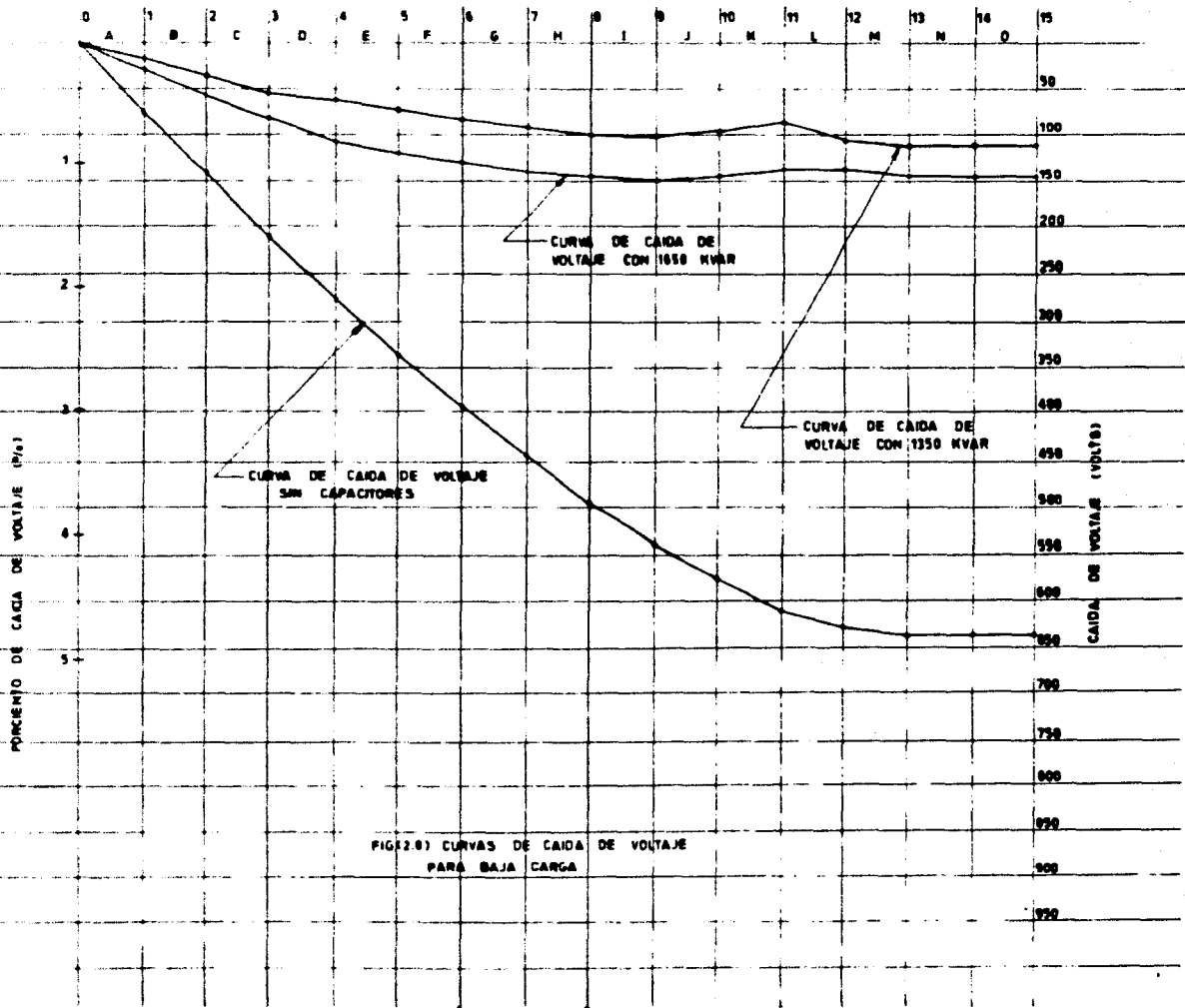


FIG. 2.0) CURVAS DE CAIDA DE VOLTAJE PARA BAJA CARGA

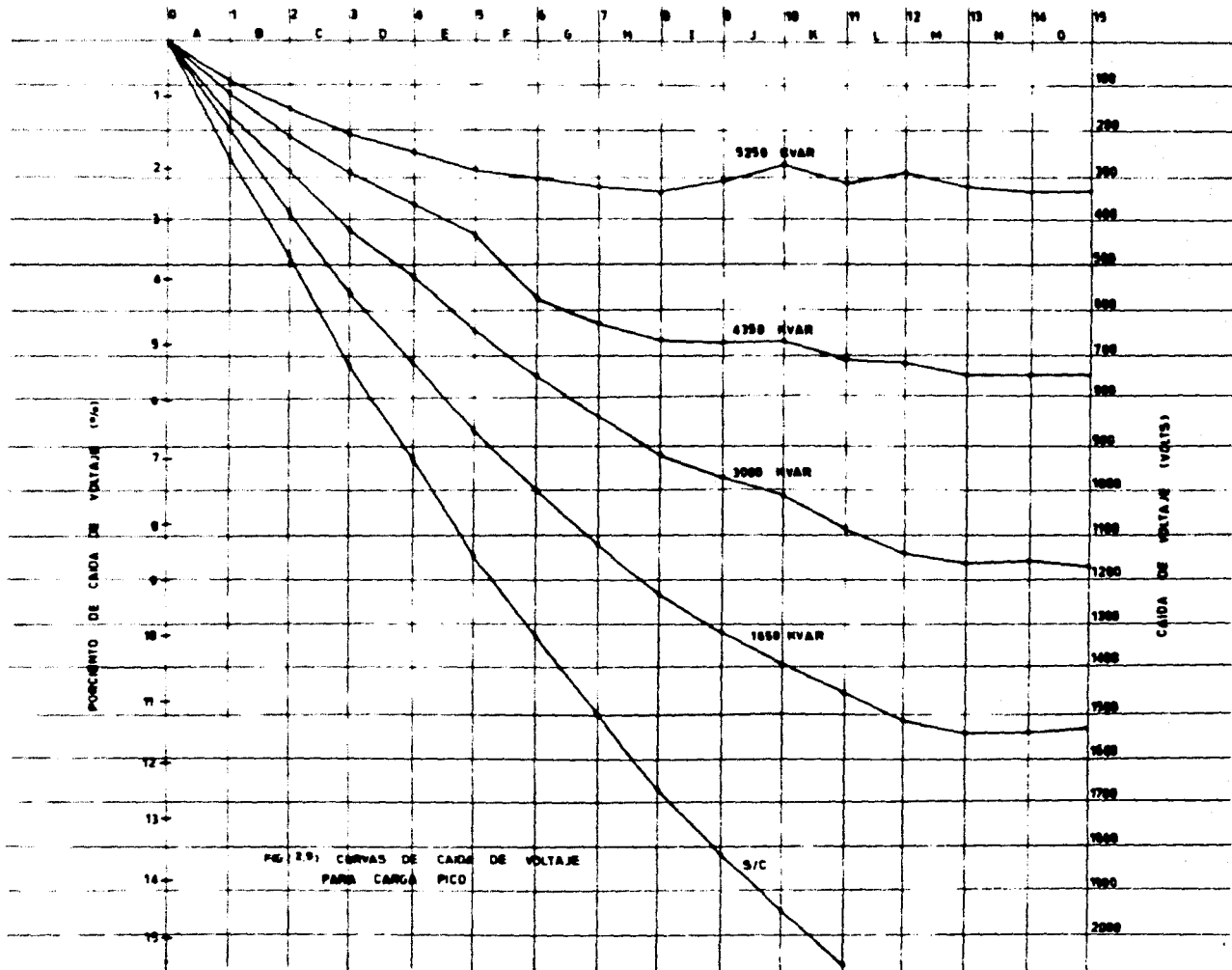


FIG. 2.9: CURVAS DE CAIDA DE VOLTAJE PARA CARGA PICO

2.6 REGULACION DE VOLTAJE.

Existen alimentadores en los cuales se tienen conectadas tanto cargas industriales como cargas residenciales, obviamente se tendrá que proporcionar mejores niveles de voltaje a las cargas industriales, ya que en estas se encuentran operando motores y máquinas para los cuales es de vital importancia tener un voltaje de operación cercano a su voltaje nominal, pues es así como alcanzan su máxima eficiencia. Sin embargo en una carga de tipo residencial no resulta tan importante tener un nivel de voltaje muy preciso.

La introducción de bancos de capacitores en alimentadores de distribución origina beneficios en la regulación de voltaje, debiendo aclararse, que existe un mal entendimiento de la regulación de voltaje cuando se usan capacitores en derivación. Los capacitores no mejoran la regulación a menos que existan capacitores desconectables. La regulación de voltaje con capacitores fijos en derivación es prácticamente la misma que sin ellos pero el nivel de voltaje es elevado.

Como es sabido la regulación de voltaje está definida de acuerdo a la expresión:

$$\%R = \frac{V_{Ro} - V_R}{V_R} \times 100 \quad (2.23)$$

Donde V_{Ro} es el voltaje al final de la línea en vacío y V_R el voltaje en el mismo punto pero a plena carga.

De la ecuación (2.23) se deduce que se tendrá una regulación óptima cuando el porcentaje de regulación tienda a cero, pero en la práctica se considera que existe

una buena regulación cuando se encuentra dentro de un rango del diez por ciento.

En la ecuación 2.23 podemos hacer las siguientes substituciones:

$$V_R = V_{Ro} - e \quad (2.24)$$

Donde "e" se conoce como el valor aproximado de caída de voltaje.

De 2.24 en 2.23

$$\% R = \frac{V_{Ro} - (V_{Ro} - e)}{V_{Ro} - e} \times 100 \quad (2.25)$$

Simplificando:

$$\% R = \frac{e}{V_{Ro} - e} \times 100 \quad (2.26)$$

$$\% R = \frac{IR \cos \theta + IX \sin \theta}{V_{Ro} - IR \cos \theta - IX \sin \theta} \times 100 \quad (2.27)$$

De la ecuación 2.26 se ve que el porcentaje de regulación depende única y exclusivamente de la caída de voltaje "e", y como se vió en la parte de elevación de voltaje, ésta puede ser reducida tanto como se quiera por medio de la utilización de capacitores en derivación (fijas y desconectables) lográndose de esta manera que el porcentaje de regulación sea mejorado.

C A P I T U L O I I I

RELEVACION DE CARGA Y REDUCCION DE PERDIDAS.

Introducción.

3.1 Relevación de carga.

3.2 Reducción de pérdidas.

3.3 Introducción a un problema real.

a) **Análisis económico por relevación de carga.**

b) **Análisis económico por reducción de pérdidas**

1a., 2a., 3a. y 4a. alternativas.

3.4 Análisis de alternativas.

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

En este capítulo se hará un análisis de relevación de carga y reducción de pérdidas en alimentadores de distribución para conocer los beneficios económicos que se involucran, se hará también un estudio de alternativas económicas para seleccionar los rangos óptimos de capacitores a instalar y satisfacer una demanda de reactivos dada disminuyendo las pérdidas.

A los ingenieros de distribución les interesa continuamente el problema de reducción de pérdidas en la línea, así como también la minimización de costos de capital. Ello es especialmente importante en los períodos de crisis económica; lo anterior está íntimamente relacionado con la instalación de bancos de capacitores fijos y desconectables sobre el sistema de distribución.

El sistema de cargas comprende como ya se ha mencionado dos componentes: potencia activa (KW) y potencia reactiva (KVAR). La potencia activa es generada en estaciones centrales, mientras que la reactiva puede ser generada en estaciones centrales, así como por capacitores. Los capacitores de potencia en derivación son una de las fuentes más económicas de potencia reactiva para cubrir las necesidades de las cargas

inductivas y líneas de distribución con un f.p. tan cercano como sea posible a la —
unidad.

Si la potencia reactiva es suministrada únicamente por estaciones centrales, las com-
ponentes del sistema, tales como generadores, transformadores, líneas de transmisión-
y distribución, equipo de desconexión y equipo de protección, tendrían que sobre di-
mensionarse, sumándose a ello pérdidas en la línea (I^2R) asociados con el incremen-
to de la corriente reactiva. Estas pérdidas son incosteables y a la vez producen reduc-
ción de niveles de voltaje indeseables.

Aunque los mayores beneficios en un sistema se obtienen cuando los capacitores son —
localizados en los centros de carga esto no es siempre práctico y económico, debido a
que se necesitarían pequeños grupos de capacitores para compensar a cada carga, ade-
más como los tamaños de los capacitores son standard, (100, 200, 300
CKVAR), no es posible compensar en forma exacta una demanda de reactivos en to-
do tiempo y de esta manera aprovechar la capacidad nominal de un banco de capaci-
tores.

3.1. RELEVACION DE CARGA.

El término relevación de carga significa que mediante capacitores se puede reducir la sobrecarga existente en un sistema o bien si el sistema no está sobrecargado, se puede agregar carga adicional a este. Los cálculos que se requieren para determinar la cantidad de carga relevada al mejorar el factor de potencia son bastante áridos, por lo que se utiliza una expresión aproximada que nos da un valor aceptable de la cantidad de carga relevada, basándose en considerar que el factor de potencia de la carga adicionada es el mismo que el factor de potencia original. La fig. 3.1 muestra un diagrama para la relevación de carga, en donde:

T_C = Capacidad relevada (en términos de porciento de carga)

$\cos \theta_1$ = Factor de potencia original.

$\cos \theta_2$ = Factor de potencia mejorado.

$\cos \theta_3$ = Factor de potencia final con carga mejorada.

Como los KVA totales no deben exceder la carga original OB, el círculo BB' establece los límites, para cumplir con esto, debe de ser igual a OB.

$$OC + T_C = OE = OB$$

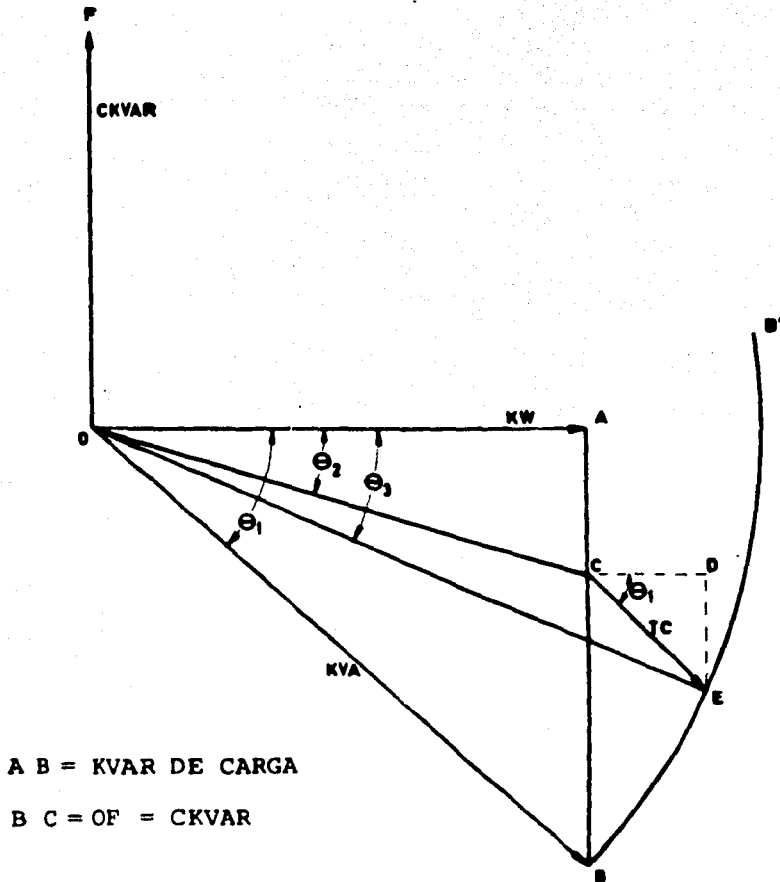


Fig. 3.1.- Diagrama para determinar la relevación de la capacidad de carga en un sistema eléctrico de potencia.

Donde:

$$OC = \text{Carga Original} + \text{Capacitores OF ó BC}$$

Para propósitos de cálculo y cuando al mejorar el factor de potencia de $\cos \theta_1$ a $\cos \theta_2$ no existe una variación grande del ángulo θ se puede utilizar la siguiente relación.

$$T_C \text{ (en KVA)} = CKVAR \times \text{sen } \theta_1$$

T_C se puede obtener de una manera más exacta:

$$T_C = \frac{KVA}{\left[\frac{CKVAR \times \text{sen } \theta_1}{KVA} - 1 + \sqrt{1 - (\cos \theta_1)^2 \left(\frac{CKVAR}{KVA} \right)^2} \right]} \quad 3.1$$

Para el mismo valor de T_C pero en porciento, tenemos:

$$\% T_C = \left[\frac{CKVAR \times \text{sen } \theta_1}{KVA} - 1 + \sqrt{1 - (\cos \theta_1)^2 \left(\frac{CKVAR}{KVA} \right)^2} \right] \times 100 \quad 3.2$$

En la fig. 3.2 se muestran las curvas trazadas a partir de la ecuación anterior.

También en casos especiales se desea conocer el valor de esta magnitud en función del factor de potencia resultante $\cos \theta_2$, para lo cual empleamos la ecuación:

$$T_C = KVA \left[\frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} - 1 \right] \quad 3.4$$

o en porciento de los KVA tenemos:

$$\% T_C = 100 \left[\frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} - 1 \right] \quad 3.5$$

En el ejemplo que trataremos más adelante utilizamos las curvas trazadas a partir de la ecuación 3.2 (fig. 3.2) para obtener el porciento de revelacion de carga del sistema eléctrico.

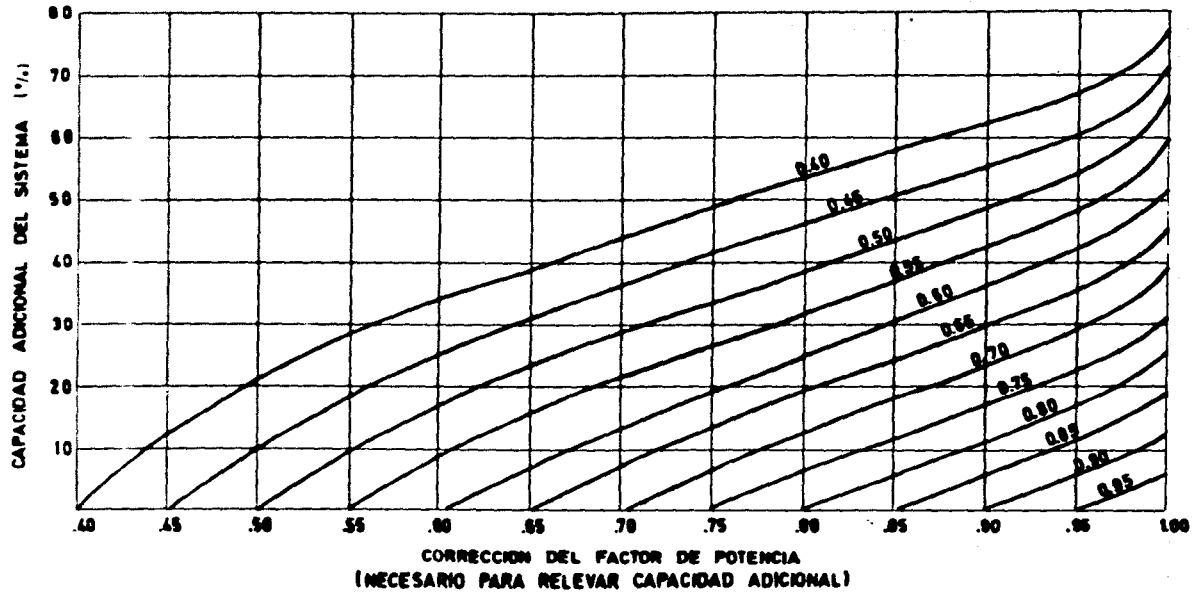


Fig. 3.2 Curvas trazadas a partir de la ecuación (3.2) para hallar el porcentaje de relevación de carga al mejorar el factor de potencia.

3.2 REDUCCION DE PERDIDAS

Al instalar capacitores de potencia, en un alimentador de distribución las pérdidas del circuito se reducen inmediatamente en un cierto porcentaje, debido a la disminución de la corriente "I" y al mejoramiento del factor de potencia.

Las pérdidas para condiciones de carga pico (KW pico), son causados por el cuadrado de la corriente "I", que circula a través de la resistencia R del circuito, o sea:

$$P = \text{Pérdidas (KW)} = \frac{I^2 R}{1000} \quad 3.6$$

$$P = \frac{R}{1000} \left[(I \cos \theta)^2 + (I \sin \theta)^2 \right] \quad 3.7$$

Donde:

$P' = \frac{R}{1000} (I \cos \theta)^2$ representa las pérdidas a la componente de la corriente en fase o sea la corriente real.

$P'' = \frac{R}{1000} (I \sin \theta)^2$ representa las pérdidas debidas a la componente de la corriente en atraso o sea a la corriente reactiva.

Para el estudio que se está tratando, supondremos por facilidad de cálculo, que las pérdidas P' permanecen constantes.

3.3 INTRODUCCION A UN PROBLEMA REAL.

Un cálculo típico se aplica al siguiente ejemplo; haciendo el análisis desde dos puntos de vista:

- a) Relevación de carga.
- b) Reducción de pérdidas.

Tomaremos como datos del problema los parámetros que se muestran a continuación.

Datos del Sistema

KVA instalados	8960.00	KVA
Corriente máxima	343.00	AMP
Voltaje nominal	13.20	KV
Factor de potencia de la carga pico a la entrada del alimentador.	0.82	
Factor de carga	0.60	
Factor de pérdidas	0.48	
Costos estimados del sistema de distribución primaria.	3200.00	\$/ KVA *
Costos estimados de generación	6400.00	\$/ KW *
Costos estimados de los capacitores	160.00	\$/ CKVAR **
Costo de pérdidas en KW - HR	0.28	\$/ KW-HR *

* Datos proporcionados por la C. L. y F.

** Valor a determinar en el desarrollo del problema.

Conceptos que se consideran en la solución del problema.

Factor de carga.- El factor de carga se define como la relación de carga promedio a carga pico.

Factor de pérdidas.- Se define como la relación de las pérdidas promedio a las pérdidas pico. La fig. 3.3 muestra la gráfica de la relación entre factor de carga y -- factor de pérdidas.

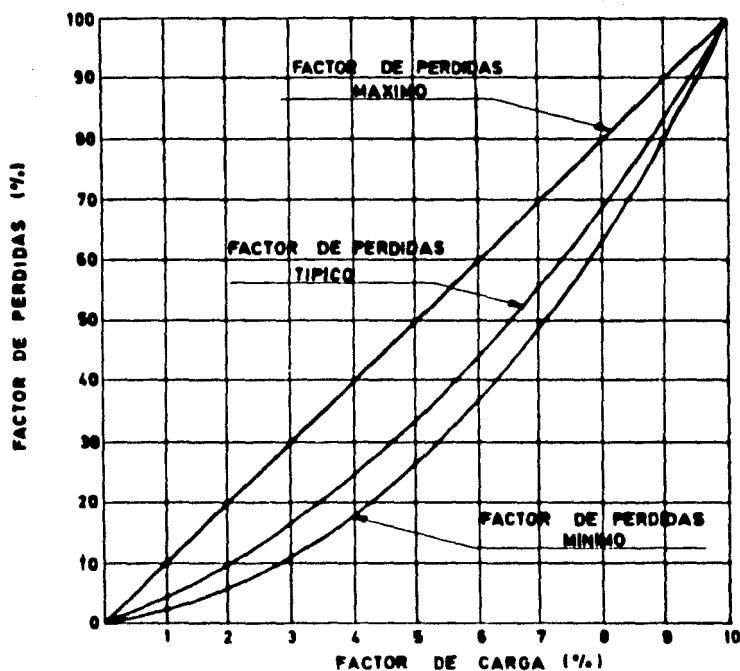


Fig. 3.3.- Gráfica de la relación de factor de carga a factor de pérdidas.

Factor de potencia económico basado sobre la capacidad relevada (KVA).- Para obtener la expresión de este factor se parte de la siguiente figura considerando que los KW permanecen constantes.

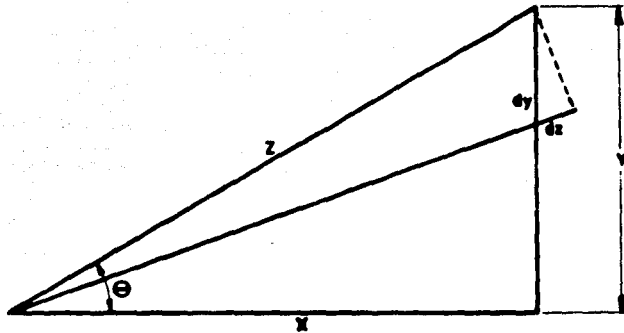


Fig. 3.4.- Triángulo para la obtención del f.p. económico.

$X = KW$ en por unidad

$Y = KVAR$ en por unidad

$Z = KVA$ en por unidad

$\theta =$ Angulo del factor de potencia inicial

También se sabe que :

$$Z^2 = X^2 + Y^2$$

Tomando la derivada parcial de Z con respecto a Y :

$$2 Z \frac{dZ}{dY} = 2Y$$

$$\frac{dZ}{dY} = \frac{Y}{Z} = \sin \theta$$

Donde:

$dY = \text{KVAR capacitivos.}$

$dZ = \text{KVA capacidad relevada.}$

$C = \text{Costo por KVAR capacitivo.}$

$S = \text{Costo por KVA del sistema.}$

Asociando el costo a su correspondiente término se tiene que:

$$\begin{aligned} C \, dY &= S \, dZ \\ &= S \, \text{sen } \theta \, dY \\ \therefore \frac{C}{S} &= \text{sen } \theta \end{aligned}$$

Por otro lado:

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

$$\text{cos}^2 \theta = 1 - \text{sen}^2 \theta$$

$$= 1 - \left[\frac{C}{S} \right]^2$$

$$\therefore \text{cos } \theta = \sqrt{1 - \left[\frac{C}{S} \right]^2}$$

3.8

La expresión anterior nos da el f.p. óptimo buscado y su correspondiente gráfica de costo de capacitores sobre costo del sistema contra factor de potencia económico se muestra en la fig. 3.5.

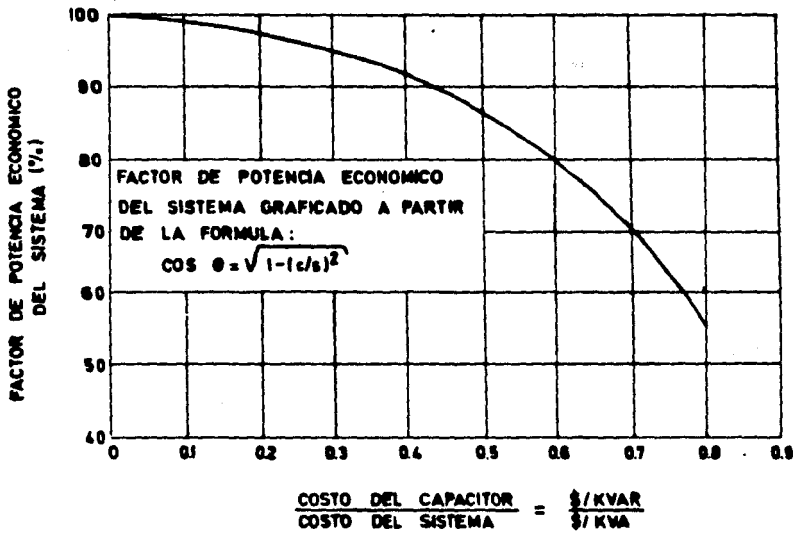


Fig. 3.5.- Factor de potencia económico del sistema trazado a partir de la fórmula 3.8.

Factor de potencia económico basado sobre la reducción de pérdidas pico.- Para obtener la expresión de este factor de potencia se parte también de la fig. 3.4. de donde se tiene que:

$$X = KW (1.0 \text{ por unidad}).$$

$$Y = KVAR \text{ en por unidad.}$$

$$Z = KVA \text{ en por unidad.}$$

$$R = \text{Resistencia del sistema en por unidad.}$$

P = Costos de pérdidas pico, \$ / KW

C = Costo de capacitores, \$ / KVAR

θ = Angulo del factor de potencia inicial.

Para obtener la expresión deseada se considera que:

- a) Las pérdidas en KW son igual a $Z^2 R$.
- b) Instalando CKVAR dY , Z se reduce en una cantidad dZ y Z^2 se reduce en $d(Z^2)$.

Por lo tanto, la reducción o incremento en pérdidas (KW) es $R d(Z^2)$.

El valor de esta reducción de pérdidas es $d(Z^2) RP$, por otro lado el costo de -- CKVAR es CdY , y el ahorro neto en pérdidas es:

$$RPd(Z^2) - CdY$$

Ahora para determinar el máximo ahorro neto en pérdidas se toma la derivada con respecto a "Y" y se iguala a cero:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dY} (\text{Ahorro neto en pérdidas}) &= \\ &= RP \frac{d(Z^2)}{dY} - C = 0 \\ \therefore \frac{d(Z^2)}{dY} &= \frac{C}{RP} \end{aligned}$$

De la fig. 3.4 se obtiene que:

$$\begin{aligned} Z^2 &= X^2 + Y^2 \\ Z^2 &= 1 + Y^2 \\ \frac{d(Z^2)}{dY} &= 2Y \end{aligned}$$

Por lo tanto, para máximo ahorro en pérdidas se tiene que:

$$Y = \frac{C}{2RP}$$

Pero, $Y = \text{Tg } \theta$, por lo que:

$$\frac{C}{2RP} = \text{Tg } \theta$$

O sea:

$$\text{Tg } \theta = \frac{\text{sen } \theta}{\text{cos } \theta} = \frac{\sqrt{1 - \text{cos}^2 \theta}}{\text{cos } \theta}$$

Luego entonces:

$$\text{cos}^2 \theta = \frac{1}{1 + \left[\frac{C}{2RP} \right]^2}$$

O sea:

$$\text{cos } \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{C}{2RP} \right]^2}}$$

3.9

Esta última expresión proporciona el f.p. óptimo buscado, sobre la reducción de pérdidas pico, la gráfica de la ecuación 3.9 se muestra en la fig. 3.6 que es la curva obtenida de la relación $\frac{C}{S}$ contra factor de potencia económico.

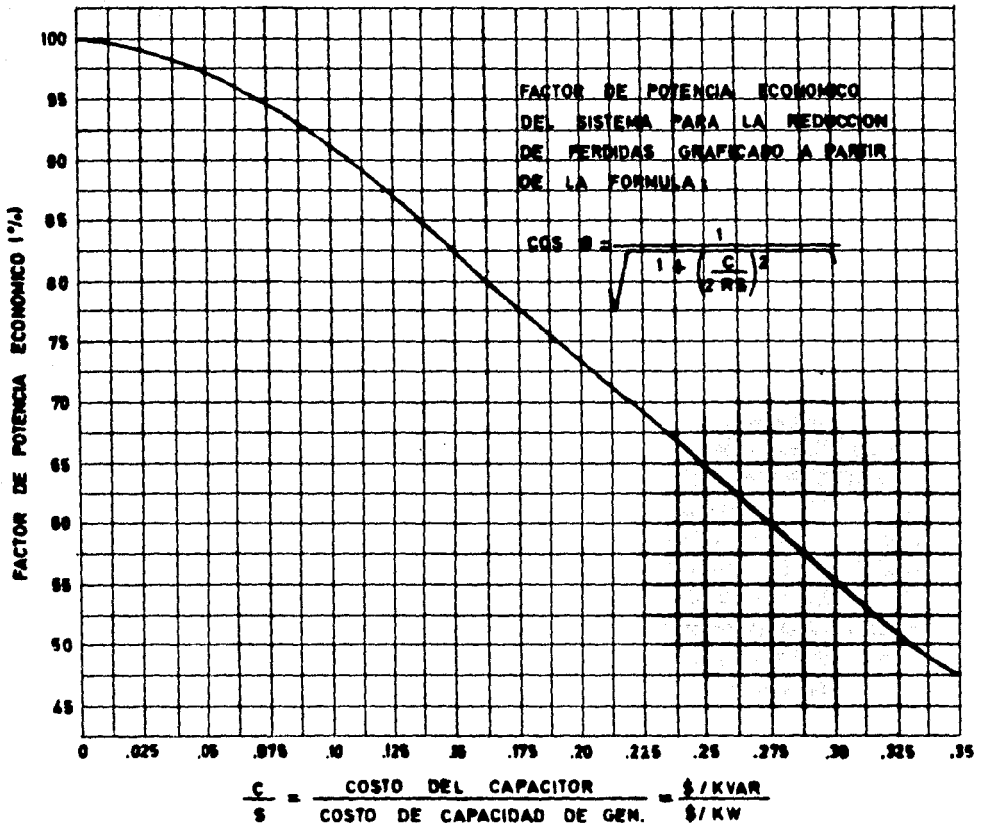


Fig. 3.6.- Factor de potencia económico del sistema trazado a -
partir de la ecuación 3.9.

a). Relevación de carga

1. Factor de potencia óptimo.

El factor de potencia más económico del sistema se estima con la ayuda de la -
fig. 3.5.

$$\frac{\$/\text{CKVAR}}{\$/\text{KVA}} = 0.05$$

De la fig. 3.5 el factor de potencia óptimo es de 0.99.

2. CKVAR requeridos para corregir a un f.p. de 0.99.

El No. de CKVAR requeridos puede ser calculado auxiliándose de la tabla - -
No. 1.2 del capítulo I, en este caso el factor para corregir de 0.82 a 0.99 es
de 0.555:

$$\begin{aligned} \text{CKVAR} &= \text{KW}_p \times 0.55 \\ &= 6430.46 \times 0.55 \\ &= 3568.9 \text{ CKVAR} \end{aligned}$$

3. Capacidad de carga relevada con capacitores.

El porcentaje de carga relevada con capacitores se determina usando la fig. 3.2,
de esta curva se ve que es de un 20%, entonces la capacidad de carga relevada
en KVA será igual a:

$$\begin{aligned} \text{KVA} &= \text{KVA}_p \times \frac{\text{porcentaje de relevación de carga}}{100} \\ &= 7842 \text{ KVA} \times \frac{20\%}{100} = 1568.4 \text{ KVA} \end{aligned}$$

4. Valor de la capacidad relevada:

$$\begin{aligned} \text{KVA relevados} \times \frac{\$}{\text{KVA}} &= 1568.4 \text{ KVA} \times 3200 \frac{\$}{\text{KVA}} \\ &= \$ 501880.00 \end{aligned}$$

5. Costo de los capacitores instalados.

$$\begin{aligned} \text{KVAR capacitivos} \times \frac{\$}{\text{CKVAR}} &= 3568.9 \text{ CKVAR} \times \frac{\$}{\text{CKVAR}} \\ &= \$ 571024.00 \end{aligned}$$

6. Ahorro en la inversión diferida:

$$\begin{aligned} \text{Valor de la capacidad relevada} - \text{costo de los cap. instalados} \\ = \$ 501880 - \$ 571024.00 = \$ 444785.00 \end{aligned}$$

Vemos claramente de este último inciso que el ahorro por relevación de carga es bastante grande comparado con la inversión en los capacitores de donde se concluye que el uso de ellos es bastante aconsejable.

b) Reducción de Pérdidas.

1. Factor de potencia óptima para minimizar las pérdidas:

El factor de potencia más económico se obtiene por medio de la fig. No. 3.6 considerando que un cierto porcentaje de los KW pico generados se pierden en la distribución de la energía.

$$\frac{C}{S} = \frac{\text{Costo promedio del capacitor / KVAR}}{\text{Costo de capacidad de generación / KW}}$$

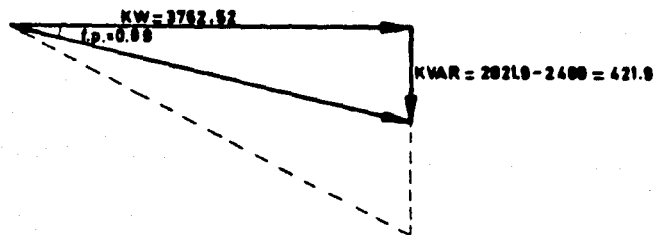
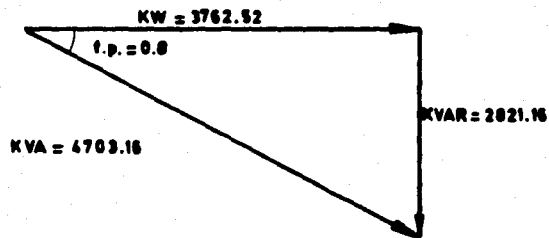
$$\frac{C}{S} = \frac{180 \$ / \text{KVAR}}{6400 \$ / \text{KW}} = 0.28$$

De la fig. 3.6 el factor de potencia óptimo es 99%

2. Reducción de Pérdidas.

En este punto se calculan las pérdidas partiendo de la suposición de que el alimentador opera a baja carga con un f.p. de 0.8 por lo que se procede a mejorar lo a un f.p. de 0.99 utilizando bancos de capacitores fijos, pero dado que a determinada hora del día se presentan las condiciones de carga pico, el f.p. volverá a bajar, consideremos que este cae nuevamente a 0.8, luego entonces lo corregiremos nuevamente hasta 0.99 mediante bancos de capacitores desconectables. En las siguientes tablas mostramos las características y condiciones del alimentador antes de ubicar los bancos, consideremos en la Tabla 3.1 que las pérdidas en el alimentador para condiciones de baja carga son alrededor de 3.5% de los KW demandados, el flujo de reactivos de 2823 KVAR contribuye con 1.24% de las pérdidas totales a baja carga, este porcentaje lo podemos disminuir si compensamos el total de reactivos, sin embargo, dados los tamaños de bancos de capacitores

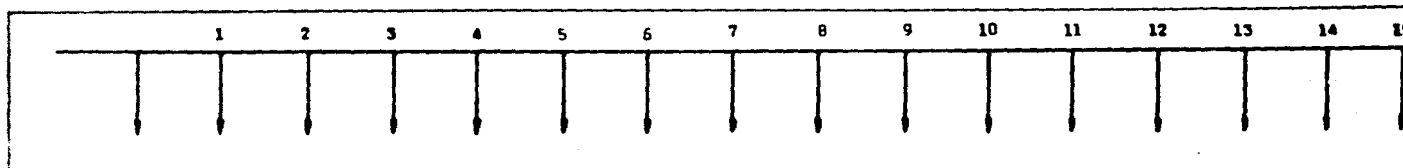
res comerciales diremos que vamos a compensar 2 400 KVAR mediante bancos de capacitores fijos, con esto corregiremos nuestro factor de potencia desde 0.8 hasta 0.99 - según se demuestra en los siguientes triángulos.



$$\tan \theta = \frac{421.9}{3762.52} = 0.1121$$

$$\theta = \text{arc tang } 0.1121 = 6.39^\circ$$

$$\cos \theta = f.p. = 0.9900$$



KVA por punto	560	360	320	170	800	200	360	1040	370	320	2170	1120	895	45	30
Corrientes I _r (amp)	12.85	8.26	11.94	3.9	18.37	4.59	8.26	23.88	8.49	7.35	49.84	25.72	20.55	1.032	0.684
Corrientes Acumuladas	208.71	192.86	184.6	172.66	168.76	150.39	145.80	137.54	113.66	105.17	97.82	47.98	22.26	1.716	0.0684
Reactivas (kVAR)	176.27	113.3	163.79	53.49	251.96	62.96	113.3	327.58	116.46	100.82	683.69	352.82	281.9	14.15	9.383
Reactivas Acumuladas	2821.9	2646.563	2532.32	2368.54	2315.05	2063.06	2000.1	1886.8	1559.22	1142.76	1341.94	658.25	305.43	23.53	9.383
I _g en o	164.64	154.63	148.02	138.47	135.35	120.652	116.98	110.366	91.257	84.184	76.268	36.395	50.958	1.3728	0.5472
I _g en o	123.48	115.97	111.01	103.85	101.51	90.489	87.735	82.774	68.443	63.111	50.701	28.796	13.363	1.2906	0.4104
Pérdidas Reales (W)	4309.9	3001.75	3483.77	3048.65	2912.17	2314.54	2175.8	1936.72	1324.12	1125.86	974.01	734.39	412.87	0.2996	0.0476
Pérdidas Reactivas (W)	2424.32	2138.39	1959.39	1714.78	1638.38	1301.93	1223.89	1089.39	744.82	633.29	547.88	131.84	28.39	0.168	0.0267

Condiciones del alimentador a bajo carga

Voltaje nominal 13.2 KV
 Capacidad instalada 8960 KVA
 Corriente máxima 343 AMP
 Resistencia 0.159 /km
 F.C. 60 %
 cos φ 80 %

De la tabla se tiene que:

Pérdidas reales, 3φ = 84.162 KW
 Pérdidas reactivas, 3φ = 46.728 KW
 Pérdidas totales, 3φ = 130.890 KW

TABLE 3.1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Corrientes Acumuladas	343	321.51	307.73	287.83	281.33	250.71	243.06	299.28	189.47	175.31	163.06	78.99	37.12	2.86	1.14
Reactivos (kVAR)	279.26	179.58	259.58	84.53	399.16	99.77	179.58	517.85	184.52	159.64	1082.56	558.67	446.47	22.44	14.85
Reactivos Acumulados	4468.46	4189.2	4009.62	3750.84	3665.51	3264.35	3166.58	2987	2469.15	2284.63	2124.94	1042.43	483.76	37.29	14.85
$I_{p17} \cos \phi$	281.28	263.63	252.33	236.02	230.69	205.58	199.3	188.00	195.36	143.75	133.78	65.59	30.43	2.3452	0.9348
$I_{p17} \sin \phi$	195.51	183.26	175.60	164.06	160.35	142.88	138.54	130.66	108.15	99.92	92.94	45.59	21.15	1.5302	0.6498
Pérdidas Reales (W)	1169.17	10520.1	9837.69	8431.06	8053.95	6398.17	6011.79	5349.4	3653.07	3127.46	2705.65	651.10	140.21	0.5158	0.1322
Pérdidas Reactivas (W)	6737.65	5917.56	5421.2	4742.44	4530.34	3597.84	3381.63	3009.33	2054.85	1755.12	1521.93	366.24	78.87	0.168	0.0749

Condiciones del alimentador a carga pico

Voltaje nominal 13.2 KV
 Capacidad instalada 8960 KVA
 Corriente admisa 343 AMP
 Resistencia 0.159 /km
 F.C. 100 %
 $\cos \phi$ 80 %

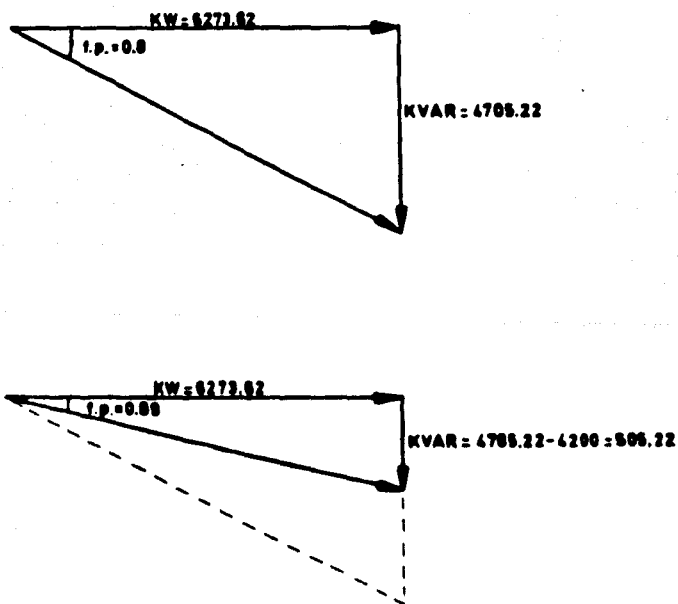
De la tabla se tiene que:

Pérdidas reales, $\Sigma P = 230 \text{ kW}$
 Pérdidas reactivas, $\Sigma Q = 130 \text{ kW}$
 Pérdidas totales, $\Sigma P = 360 \text{ kW}$

T A B L A 3.2

De esta manera demostramos que al compensar con 2400 KVAR mediante capacitores fijos estamos corrigiendo al f.p. óptimo para pérdidas que se encontró en el inciso 1.

De la tabla 3.2 para condiciones del alimentador a carga pico vemos que tenemos un total de 5.6% de pérdidas ocasionadas por un flujo de reactivos de 4705.22 KVAR, si para disminuir esta cantidad de pérdidas compensamos 4200 KVAR debido a los tamaños de bancos comerciales, de los cuales, 2400 son bancos fijos y 1800 son bancos desconectables, con esto corregimos nuestro factor de potencia desde 0.8 hasta 0.99.



$$\tan \theta = \frac{505.22}{6273.62} = 0.04196$$

$$\theta = \arctan 0.0805 = 4.580$$

$$\cos \theta = f.p. = 0.9909$$

De nuevo comprobamos que al compensar 4200 KVAR corregimos factor de potencia desde 0.8 hasta 0.99.

Ya conocidas las pérdidas y los CKVAR necesarios, propondremos una serie de combinaciones de tamaños de bancos para satisfacer la demanda de reactivos de 4200 - KVAR y veremos cual de ellas nos ofrece máximos beneficios vistos estos como reducción de pérdidas, relevación de carga y mínimo costo de capacitores, para cada alternativa se procederá de la siguiente forma:

- a) Se ubicarán los bancos fijos de capacitores de acuerdo al método Schmill, por facilidad se procederá por medio de los números característicos.
- b) Se ubicarán los bancos de capacitores desconectables de acuerdo al método de flujo de reactivos descrito en el Capítulo II, cabe hacer notar que para este caso se tomarán en cuenta las condiciones introducidas por los bancos fijos.
- c) Se determinará el costo total de los CKVAR a instalar en el sistema y es aquí donde se toman en cuenta los costos de los bancos, equipo de control, equipo de protección y accesorios.

Capacitor monofásico de 200 KVAR	\$ 16,600.0
Bastidor tipo poste de 3 U	3,565.8
Bastidor tipo poste de 6 U	4,397.4
Bastidor tipo poste de 9 U	5,325.6
Bastidor tipo poste de 12 U	5,880.0
Corta-circuitos fusibles para 15 KV	2,000.0

Crucetas para fijar los fusibles	\$ 1,000.0
Caja de conexiones para los desconectores (tres desconectores en una caja)	1,000.0
Desconectores monofásicos en aceite (para los bancos desconectables)	7,800.0
Transformador de potencial (para bancos fijos y desconectables)	4,000.0

Con todos los elementos de la lista, se forman los bancos fijos y desconectables para suministrar los reactivos necesarios. Los bancos fijos constarán de los bancos necesarios para obtener la capacidad deseada, de un bastidor cuyo tamaño depende del número de capacitores que se desean colocar en él, de tres cortacircuitos fusibles (uno por cada fase), de tres crucetas que sirven para apoyar cada uno de los fusibles y equipo de protección. Los bancos desconectables, además de los elementos que llevan a los bancos fijos, llevan tres desconectores, y un sistema de control, para este caso se utiliza un control de voltaje.

d) A partir de los nuevos flujos de reactivos introducidos por la ubicación de los bancos, se obtiene la correspondiente disminución de pérdidas, se considera -- que las pérdidas debidas a la parte real de la corriente total permanecen invariables y que únicamente las ocasionadas por la parte reactiva se ven disminuidas en cierto porcentaje.

e) Evaluación de la reducción de pérdidas.

$$\text{Valor de reducción de pérdidas} = \text{Reducción de pérdidas} \times \$/\text{KW}.$$

f) Costo de los capacitores a instalar (CKVAR).

Primeramente se obtienen los capacitores necesarios para corregir de un factor de potencia de 0.8 a 0.99.

$$\text{Costo de CKVAR} = \text{Capacitores necesarios} \times \$/\text{CKVAR}.$$

g) Obtención del ahorro de energía por año.

$$\text{Ahorro en KW} = \text{HR} = \text{Reducción de pérdidas pico} \times \text{HRS/año}$$

$$\text{Valor anual de la energía ahorrada} = \text{ahorro en KW} \times \$/\text{KW}.$$

h) Evaluación de los beneficios netos en la reducción de pérdidas.

Los beneficios obtenidos son igual a la relevación de la capacidad de generación debida a la reducción de pérdidas menos el costo de capacitores.

Para obtener el beneficio neto anual considerando un promedio de vida útil de los capacitores (fijos y desconectables) de 15 años y una tasa de incremento del 12%, se recurre a la siguiente fórmula de ingeniería económica, para la obtención de las anualidades obtenidas durante 15 años.

$$A = P (A/P, i, n)$$

i - Representa una tasa de interés por período.

n - Representa un número de períodos.

A - Representa una serie de anualidades uniformes sujeta a un período "n" y a una tasa de interés "i".

P - Representa el valor presente de una cantidad.

Para condiciones del problema descrito, la fórmula anterior queda escrita de la siguiente manera:

$$A = P (A/P, 12, 15) = P (0.14682)$$

Si a este valor de anualidad se suma el beneficio anual debido a la energía ahorrada (g), obtenemos finalmente el beneficio anual neto por año.

- i) Finalmente, a partir del beneficio anual neto se determina el porcentaje de retorno anual sobre la inversión inicial de los capacitores de potencia.

Primera Alternativa

- a) Se ubicarán dos bancos fijos de 1200 KVAR.

Puesto que para este ejemplo el factor de carga es de 60% se formará una tabla similar a la tabla 2.1 utilizando la ec. 2.3: (tabla 3.3).

$$C_1 = 0.5 C = 0.5 \times 1200 \text{ CKVAR} = 600 \text{ CKVAR}$$

$$C_2 = 1.5 C = 1.5 \times 1200 \text{ CKVAR} = 1800 \text{ CKVAR}$$

Por lo tanto, refiriéndose a la tabla 3.3 se encuentra que los capacitores quedan ubicados en los puntos 8 y 12.

- b) Se ubicarán tres bancos desconectables de 600 CKVAR. En la tabla 3.4 podemos apreciar el flujo de reactivos para la primera alternativa concluyendo que los capacitores quedan ubicados en los puntos 3, 10 y 11.

- c) Costo de los bancos.

Lista de capacitores, accesorios y precios de ellos.

21 Capacitores de 200 CKVAR (16,600 c/u)	\$ 348,600
2 Bastidores tipo poste de 6 unidades	8,794
3 Bastidores tipo poste de 3 unidades	10,695
21 Corta - Circuitos fusibles	42,000
21 Crucetas para fijar los fusibles	21,000
9 Desconectores monofásicos	70,000
3 Cajas para desconectores	3,000
15 T.P. para protección más cinco voltmetros	60,000
3 Controles automáticos de voltaje	30,000
	<u>\$ 594,289</u>

PUNTO Núm.	KVA.	KVAR
0	8960	2823.13
1	8960	2823.13
2	8400	2646.68
3	8040	2533.25
4	7520	2369.41
5	7350	2315.85
6	6550	2063.78
7	6350	2000.77
8	5990	1887.34
9	4950	1559.65
10	4580	1443.07
11	4260	1342.24
12	2090	658.52
13	970	305.63
14	75	23.63
15	30	9.45

TABLA 3.3

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
				600						1200		600	600	1200		
Costo (KVAR)	279.26	179.58	259.58	84.53	399.16	99.77	179.58	517.85	184.52	159.64	1082.56	558.67	446.47	22.44	14.85	
Ubicación del 1er banco desconectable																
Punto N° 1	1468.46	1189.20	1009.62	750.04	665.51	266.35	166.58	13	669.15	484.63	324.99	757.57	116.24	562.71	585.15	
" " 2 3	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	14.85
" " 3	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	37.29	14.85
" " 4	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	483.76	37.29	14.85
" " 5	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	157.57	483.76	37.29	14.85	
" " 6	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	924.99	157.57	483.76	37.29	14.85	
" " 7	"	"	"	"	"	"	"	"	"	1084.63	924.99	157.57	483.76	37.29	14.85	
Ubicación del 2º banco desconectable																
Punto N° 5	868.26	589.20	409.62	150.04	65.51	333.67	433.42	613	69.15	115.37	275.01	157.57	483.76	37.29	14.85	
" " 6	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	324.99	157.57	483.76	37.29	14.85	
" " 7	"	"	"	"	"	"	"	"	"	484.63	324.99	157.57	483.76	37.29	14.85	
" " 8	"	"	"	"	"	"	"	"	669.15	484.63	324.99	157.57	483.76	37.29	14.85	
<p>Tabla 3.4.-Análisis de flujos de reactivos para la 1a. alternativa</p> <p>Se ubican dos bancos fijos de 1200 KVAR y tres bancos desconectables de 600 KVAR</p>																

TABLA 3.4 (Continuación)

Ubicación del 3er banco desconectable																
Punto N°	5	268.56	10.70	190.28	449.86	534.39	939.55	1033.32	1212.90	530.75	715.37	875.01	157.57	483.76	37.29	14.85
" "	6	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	275.01	157.57	483.76	37.29	14.85
" "	7	"	"	"	"	"	"	"	"	"	115.37	275.01	157.57	483.76	37.29	14.85
" "	8	"	"	"	"	"	"	"	"	69.15	115.37	275.01	157.57	483.76	37.29	14.85
" "	9	"	"	"	"	"	"	"	613.	69.15	115.37	275.01	157.57	483.76	37.29	14.85
" "	13	"	"	"	"	"	"	433.42	613	69.15	115.37	275.01	157.57	483.76	37.29	14.85
" "	11	"	"	"	"	"	333.65	433.42	613	69.15	115.37	375.01	157.57	483.76	37.29	14.85
" "	12	"	"	"	"	65.51	333.65	433.42	613	69.15	115.37	375.01	157.57	483.76	37.29	14.85
" "	13	"	"	"	150	65.51	333.65	433.42	613	69.15	115.37	375.01	157.57	483.76	37.29	14.85
" "	14	"	"	409.58	150	65.51	333.65	433.42	613	69.15	115.37	375.01	157.57	483.76	37.29	14.85
" "	15	"	589.70	409.58	150	65.51	333.65	433.42	613	69.15	115.37	375.01	157.57	483.76	37.29	14.85

Considerando los flujos de reactivos al ubicar el último banco desconectable en el punto N° 13 podemos obtener las pérdidas debidas a esos flujos estas se calculan con las siguientes fórmulas:

$$I_x = I \sin \theta = \frac{KVAR}{\sqrt{3} KV}$$

$$Pérdidas = I_x^2 R$$

De donde:

pérdidas (W)	21.93	105.77	51.02	6.84	1.30	33.81	57.14	3.88	1.454	4.023	25.03	7.55	71.48	0.4228	0.067
--------------	-------	--------	-------	------	------	-------	-------	------	-------	-------	-------	------	-------	--------	-------

pérdidas totales para esta alternativa $I = 0389 \text{ KW}; P_3 = 1.16 \text{ KW}$

De esta cantidad consideramos un 12% de gastos de operación y administración.

$$\$ 594,289 + 0.12 (\$594,289) = \$665,603.68$$

Entonces tendremos el costo por CKVAR:

$$\frac{\$ 665,603.68}{4200 \text{ KVAR}} = 158.00 \frac{\$}{\text{KVAR}}$$

d). Disminución de pérdidas.

$$\text{Pérdidas reales} = 230 \text{ KW}$$

$$\text{Pérdidas reactivas} = 1.16 \text{ KW}$$

$$\text{Pérdidas totales} = 231.16 \text{ KW}$$

$$\text{Disminución de pérdidas} = 360 \text{ KW} - 231.16 \text{ KW}$$

$$= 128.84 \text{ KW}$$

e). Valor de reducción de pérdidas.

$$128.84 \text{ KW} \times 6400 \frac{\$}{\text{KW}} = \$ 824,576.00$$

f). Costo de CKVAR.

$$4200 \text{ KVAR} \times 158.00 \frac{\$}{\text{KVAR}} = \$663,600.00$$

g) Ahorro en KW - HR :

$$128.84 \text{ KW} \times 0.48 \times 8760 \text{ HRS} = 541,746.43 \text{ KW} - \text{HR}$$

Valor anual de la energía ahorrada =

$$= 541,746.43 \text{ KW} - \text{HR} \times 0.28 \frac{\$}{\text{KW} - \text{HR}}$$

$$\$ 151,689.00$$

h). **Beneficios totales:**

$$\text{Beneficios} = \$ 824,576 - \$ 663,600$$

$$= \$ 160,976.00$$

Beneficios netos:

$$A = P (A/P, 12, 15)$$

$$A = \$ 160,976 \times 0.14682$$

$$A = \$ 23,634.5$$

$$\text{Beneficio anual neto al año} = \$ 23,634.5 + \$ 151,689.00$$

$$= \$ 175,323.00$$

i). **El porcentaje de retorno anual sobre la inversión inicial es de 26.41 %.**

Segunda Alternativa

a). Se ubicarán dos bancos fijos de 1200 CKVAR

$$C_1 = 0.5 C = 0.5 \times 1200 \text{ CKVAR} = 600 \text{ CKVAR}$$

$$C_2 = 1.5 C = 1.5 \times 1200 \text{ CKVAR} = 1800 \text{ CKVAR}$$

De la tabla 3.3 se encuentra que los capacitores quedan ubicados en los puntos 8 y 12.

b). Se ubicará un banco desconectable de 1800 CKVAR.

Al formar la tabla de flujos de reactivos y pérdidas de manera similar a la primera alternativa el banco queda ubicado en el punto 12.

c). Costo de los bancos.

Lista de capacitores, accesorios y precios de ellos.

21	Capacitores de 200 CKVAR (16,600 c/u)	\$ 348,600.00
2	Bastidores tipo poste de 6 unidades	8,794.00
1	Bastidor tipo poste de 9 unidades.	5,325.00
21	Corta-circuito fusibles	42,000.00
21	Crucetas para fijar los fusibles	21,000.00
3	Desconectores monofásicos	23,400.00
1	Caja para los desconectores	1,000.00
9	T.P. más tres voltmetros	36,000.00
1	Control automático de voltaje	10,000.00

Total \$ 496,119.00

De esta cantidad consideramos un 12% de gastos de operación y administración.

$$\$496,119.00 + 0.12 (\$496,119) = \$555,653.28$$

Entonces tendremos el costo por CKVAR:

$$\frac{\$555,653.28}{4200 \text{ KVAR}} = 132.00 \frac{\$}{\text{KVAR}}$$

d). Disminución de pérdidas.

$$\text{Pérdidas reales} = 230 \text{ KW}$$

$$\text{Pérdidas reactivas} = 0.334 \text{ KW}$$

$$\text{Pérdidas totales} = 230.334 \text{ KW}$$

$$\text{Disminución de pérdidas} = 360 \text{ KW} - 230.334 \text{ KW}$$

$$= 129.66 \text{ KW}$$

e). Valor de reducción de pérdidas:

$$129.66 \text{ KW} \times 6400 \frac{\$}{\text{KW}} = \$ 829,862.40$$

f). Costo de CKVAR

$$4200 \text{ KVAR} \times 132.00 \frac{\$}{\text{KVAR}} = \$554,400.00$$

g). Ahorro en KW - HR:

$$129.66 \text{ KW} \times 0.48 \times 8760 \text{ HRS} = 545,194.37 \text{ KW - HR}$$

Valor anual de la energía ahorrada

$$= 545,194.37 \text{ KW} - \text{HR} \times 0.28 \frac{\$}{\text{KW} - \text{HR}}$$

$$= \$152,654.42$$

h). Beneficios totales :

$$\text{Beneficios} = \$829,864.40 - \$554,400.00$$

$$= \$275,464.00$$

Beneficios netos :

$$A = P (A/P, 12, 15)$$

$$A = \$275,464.00 \times 0.14682$$

$$A = \$40,443.62$$

$$\text{Beneficio anual neto} = \$40,443.62 + \$152,654.42$$

$$= \$175,323.00$$

i) El porcentaje de retorno anual sobre la inversión inicial es de 34.83 %.

Tercera Alternativa

- a) Se ubicarán cuatro bancos fijos de 600 CKVAR

$$C_1 = 0.5 C = 0.5 \times 600 \text{ CKVAR} = 300 \text{ CKVAR}$$

$$C_2 = 1.5 C = 1.5 \times 600 \text{ CKVAR} = 900 \text{ CKVAR}$$

$$C_3 = 2.5 C = 2.5 \times 600 \text{ CKVAR} = 1500 \text{ CKVAR}$$

$$C_4 = 3.5 C = 3.5 \times 600 \text{ CKVAR} = 2100 \text{ CKVAR}$$

De la tabla 3.3 se encuentra que los capacitores quedan ubicados en los puntos 5, 9, 11, y 13.

- b) Se ubicarán tres bancos desconectables de 600 CKVAR.

Al formar la tabla de flujos de reactivos y pérdidas de manera similar a la primera alternativa los capacitores quedan ubicados en los puntos 3, 11, y 12

- c) Costo de los Bancos.

Lista de capacitores, accesorios y precios de ellos.

21	Capacitores de 200 CKVAR (16,600 c/u)	\$348,600.00
2	Bastidores tipo poste de 3 unidades	14,260.00
3	Bastidores de 3 unidades	10,695.00
21	Cortacircuitos fusibles	42,000.00
9	Desconectores monofásicos	70,200.00
3	Cajas para desconectores	3,000.00
21	T.P. más siete voltmetros	84,000.00
3	Controles automáticos de voltaje	<u>30,000.00</u>
	Total	\$623,755.00

De esta cantidad consideramos un 12% de gastos de operación y administración.

$$\$623,755.00 + 0.12 (\$623,755.00) = \$698,605.6$$

Entonces tendremos el costo por CKVAR:

$$\frac{\$698,605.6}{4200 \text{ KVAR}} = 166 \frac{\$}{\text{KVAR}}$$

d) Disminución de pérdidas.

$$\text{Pérdidas reales} = 230 \text{ KW}$$

$$\text{Pérdidas reactivas} = 0.587 \text{ KW}$$

$$\text{Pérdidas totales} = 230.587 \text{ KW}$$

$$\text{Disminución de pérdidas} = 360 \text{ KW} - 230.587 \text{ KW}$$

$$= 129.413 \text{ KW}$$

e). Valor de reducción de pérdidas:

$$129.413 \text{ KW} \times 6400 \frac{\$}{\text{KW}} = \$828,243.20$$

f). Custo de CKVAR.

$$4200 \text{ KVAR} \times 166.00 \frac{\$}{\text{KVAR}} = \$697,200.00$$

g). Ahorro en KW - HR

$$129.413 \text{ KW} \times 0.48 \times 8760 \text{ HRS} = 544,156.00 \text{ KW} - \text{HR}$$

Valor anual de la energía ahorrada =

$$= 544,156 \text{ KW-HR} \times 0.28 \frac{\$}{\text{KW} - \text{HR}}$$

h). Beneficios totales:

$$\text{Beneficios} = \$828,243 - \$697,200$$

$$= \$131,043$$

Beneficios netos:

$$A = P (A/P, 12, 15)$$

$$A = \$131,043 \times 0.14682$$

$$A = \$19,240$$

$$\text{Beneficios anual neto} = \$19,240.00 + \$152,364.00$$

$$= \$171,604$$

i). El porcentaje de retorno anual sobre la inversión inicial . es de 24.6%

Cuarta Alternativa

a). Se ubicarán dos bancos fijos de 600 y 1800 CKVAR respectivamente.

$$C_1 = 0.5 C_{e1} = 0.5 \times 600 \text{ CKVAR} = 300 \text{ CKVAR}$$

$$C_2 = C_1 + 0.5 \times C_{e2} = 1200 \text{ CKVAR}$$

Nuevamente nos referimos a la tabla 3.3 y se encuentra que los capacitores - de 600 y 800 quedan ubicados en los puntos 13 y 11 respectivamente.

b). Se ubicará un banco desconectable de 1800 CKVAR.

Al formar la tabla de flujos de reactivos y pérdidas de manera similar a la primera alternativa el banco queda ubicado en el punto 5.

c). Costo de los bancos.

Lista de capacitores, accesorios y precios de ellos.

21	Capacitores de 200 CKVAR (16,600 c/u)	\$348,600.00
1	Bastidor tipo poste de 6 unidades	4,397.00
1	Bastidor tipo poste de 3 unidades	3,565.00
2	Bastidores tipo poste de 9 unidades	10,650.00
21	Corta-Circuito fusibles	42,000.00
21	Crucetas para fijar los fusibles	21,000.00
3	Desconectores monofásicos	23,400.00
1	Caja para desconectores	1,000.00
9	T. P. más tres voltmetros	36,000.00
1	Control automático de voltaje	<u>10,000.00</u>
	Total	\$479,611.00

De esta cantidad consideramos un 12% de gastos de Operación y Administración.

$$\$479,611.00 + 0.12 (479,611.00) = 537,164.32$$

Entonces tendremos el costo por CKVAR:

$$\frac{\$537,164.00}{4200 \text{ KVAR}} = 128 \frac{\$}{\text{CKVAR}}$$

d). Disminución de pérdidas.

$$\text{Pérdidas reales} = 230.00 \text{ KW}$$

$$\text{Pérdidas reactivas} = 2,355 \text{ KW}$$

$$\text{Pérdidas totales} = 232.355 \text{ KW}$$

$$\text{Disminución de pérdidas} = 360 \text{ KW} - 232.35 \text{ KW}$$

$$= 127.65 \text{ KW}$$

e). Valor de reducción de pérdidas:

$$127.65 \text{ KW} \times 6400.00 \frac{\$}{\text{KW}} = \$816,960.00$$

f). Costo de CKVAR:

$$4200 \text{ KVAR} \times 128.00 \frac{\$}{\text{KVAR}} = \$537,600.00$$

g). Ahorro en KW - HR:

$$127.65 \text{ KW} \times 0.48 \times 8769 \text{ HRS} = \$536,742.00 \text{ KW} - \text{HR}$$

Valor anual de la energía ahorrada =

$$= 536,742.00 \text{ KW} - \text{HR} \times 0.28 \frac{\$}{\text{KW} - \text{HR}}$$

$$= \$150,288.00$$

h). Beneficios totales:

$$\text{Beneficios} = \$816,960.00 - \$537,600.00$$

$$= \$279,360.00$$

Beneficios netos:

$$A = P (A/P, 12, 15)$$

$$A = \$279,360.00 \times 0.1468$$

$$A = \$41,016.00$$

$$\text{Beneficio anual neto} = \$41,016 + \$150,288.00$$

$$= \$191,304.00$$

i). El porcentaje de retorno anual sobre la inversión inicial es de 35.58%

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

Para hacer el análisis de las alternativas propuestas y a la vez, elegir la más óptima es conveniente resumir todos los resultados en la siguiente tabla.

Alter- native	Bancos fijos CKVAR	Bancos descon- rec. CKVAR	Diam. de pérdi- das (%)	Diam. de pérdi- das (\$)	Costo por CKVAR (\$)	Costo total CKVAR (\$)	Benefi- cio anu- al neto (\$)	Retorno anual (%)
1	2 DE 1200	3 DE 600	2.08	824,576	158	663,600	175,323	26.41
2	2 DE 1200	1 DE 1800	2.018	829,864	132	554,400	193,098	34.83
3	4 DE 600	3 DE 600	2.015	828,243	161	672,200	175,274	25.92
4	1 DE 600 1 DE 1800	1 DE 1800	1.98	816,360	128	537,600	191,304	35.58

Tabla 3.5. - Resultado de las alternativas propuestas.

Haciendo el análisis de alternativas por el método de la relación de beneficios a costo se obtiene que la cuarta alternativa es la más conveniente, ya que con ella obtenemos la más alta tasa de retorno sobre la inversión inicial en el costo de los capacitores que es de 35.58%.

Del estudio realizado en lo que concierne a los beneficios más importantes aportados por los capacitores: Relevación de carga y reducción de pérdidas, proporciona resultados muy importantes a las compañías suministradoras de energía eléctrica, dado que se tiene un panorama bastante amplio de la inversión inicial y de los beneficios monetarios que se pueden obtener, así como la elección de la alternativa más económica.

C O N C L U S I O N E S

En este trabajo hemos visto la gran variedad de aplicaciones que tienen los capacitores tales como: Reducción de pérdidas, control de los niveles de voltaje, regulación de voltaje, relevación de carga, corrección del factor de potencia, etc. Podemos entonces decir que para lograr cada uno de los beneficios mencionados existe una ubicación óptima que raras veces coincide para los diferentes objetivos buscados. Como ejemplo de esto podemos citar que con el método Schmill se logra máxima reducción de pérdidas y que generalmente los bancos de capacitores quedan uniformemente distribuidos a lo largo del alimentador, para el método de control de voltaje vemos que los capacitores quedan ubicados más allá del 80% de la distancia del alimentador. El beneficio que siempre aparece cuando se emplean los capacitores sea cual fuere el objetivo buscado, es la relevación de carga, pues el solo empleo de ellos produce reducción de flujo de reactivos, por lo que esta reducción provocará ahorro en la generación de energía o bien esta energía que se está dejando de utilizar se puede emplear para alimentar una carga adicional.

Es importante hacer notar que para el empleo de capacitores se debe tener en cuenta ante todo el aspecto económico, ya que se deben lograr beneficios en los alimentadores pero no a costa de grandes gastos que hicieran antieconómico su uso.

B I B L I O G R A F I A

1. A Method of Applying Switched and Fixed Capacitors For Voltaje Control;
W.W. Baum, senior member IEEE.
2. Aplicación de Capacitores en Sistemas de Distribución
Ing. Walter Lingard Woog.
3. Cálculo de Capacitores; C F E Depto. de Ingeniería y Distribución.
4. Capacitores de Potencia; Balmec, S. A., Dr. Alfredo Navarro Crespo.
5. Control del Factor de Potencia; Balmec, S. A.
6. Costo Real de los Reactivos en un Sistema Eléctrico de Potencia;
Tesis Profesional, Ing. Luis Santillán Calzada.
7. El Factor de Potencia en los Costos de Producción;
Depto. Eléctrico de Selmec; Ing. Antonio Mizuno.
8. Electrical Transmission and Distribution, Reference Book Central Station Engineers of Wastinghouse Electric Corp. East Pittsburgh Pennsylvania, U.S.A.;
1964.
9. Elements of Power Systems Analysis; Stenvenson William P.
10. Física General; Sears Semansky.

11. Industrial Power Systems Handbook; Beeman.
12. Ingeniería Económica; Grant Ireason.
13. Instalación de Capacitores en Subestaciones; Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S. A., Ing. Jorge León Aponte.
14. Localización Óptima de Capacitores en Derivación; Compañía de Luz y Fuerza del Centor, Ing. J. V. Schmill.
15. Producción de Potencia Reactiva en los Sistemas Eléctricos; Ing. Jacinto Vigueira Landa.
16. Redes Eléctricas Volúmenes I y II; Jacinto Vigueira Landa.
17. The Three "RS" of Capacitors; capacitor Department General Electric Company.