

Universidad Nacional de Ingeniería

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



“ Dimensionamiento y Localización Optima de Capacitores en Redes de Distribución Primaria ”

T E S I S

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

JOSE LUIS ERAUSQUIN EYZAGUIRRE

PROMOCION: 1982 - I

LIMA • PERU • 1990

T A B L A D E C O N T E N I D O S

		Pag.
	PROLOGO	
CAP.1	INTRODUCCION	4
CAP.2	METODOLOGIA	8
2.1	Configuración Topológica de las Redes de Distribución Primaria	8
2.2	Alimentador Equivalente por Unidad	8
2.3	Función Distribución de Corriente Reactiva	11
2.4	Formulación para la Reducción de Pérdidas de Potencia y Energía	14
2.5	Problemas de Optimización	27
2.5.1	Localización Optima de los Capacitores	27
2.5.2	Tamaño Optimo de los Capacitores	30
2.5.3	Optimización de Capacitores Conmutables	39
2.6	Flujo de Carga	45
2.6.1	Influencia de la Tensión en la Potencia Inyectada por el Capacitor	47
2.6.2	Influencia de la Potencia Reactiva en los Niveles de Tensión	48
2.6.3	Flujo de Carga	52
CAP.3	PROGRAMA COMPUTACIONAL	60
3.1	Datos de Entrada	61
3.1.1	Parámetros y Datos de Redes y Subestaciones	61
3.1.2	Determinación de los Parámetros K_p, K_e y K_c .	62

	Pag.
3.2 Programa Principal	63
3.3 Sub-Rutina de Optimización	65
3.4 Manual de Usuario	66
 CAP.4 APLICACIONES	 70
4.1 Caso del Alimentador A-1 de la Sub-Estación de Transmisión Puente	70
4.2 Caso del Alimentador B-6 de la Sub-Estación de Transmisión Barranco	94
4.3 Comparación de Alternativas - Capacitores / Reforma en Redes 10 kV	98
 CAP.5 DISEÑO	 118
5.1 Componentes y Configuración Interna	118
5.2 Temperatura de Operación	121
5.3 Nivel de Aislamiento, Capacidades Disponibles, Dimensiones y Pesos	123
5.4 Tipos de Conexión	127
5.5 Operación Normal	132
5.6 Operación con Sobrevoltajes	132
5.7 Operación con Sobrecorriente	133
5.8 Oil Switches	136
5.9 Tipo de Instalación	138
5.10 Dispositivos de Control	140
5.10.1 Control de Voltaje Electrónico (Socket Mounted)	141
5.10.2 Control de Voltaje Electrónico (Cabinet Mounted)	142

	Pag.
5.11 Protección	144
CONCLUSIONES	155
BIBLIOGRAFIA	160
AFENDICES	163
A Diagrama de Flujo de Programa Principal	163
B Diagrama de Flujo de Sub-rutina Optimización	166
C Catálogos	169

PROLOGO

El presente tema de tesis trata de la aplicación de capacitores en las redes de distribución primaria 10 kV., como una alternativa de solución a los problemas de excesiva caída de tensión y pérdidas de potencia y energía.

El capítulo 2, muestra la configuración de las redes de distribución primaria. Se define el concepto de "Alimentador Equivalente por Unidad", se formulan las ecuaciones de pérdidas de energía y potencia, se define la función ahorro que valoriza la reducción de pérdidas de potencia y energía, y se plantea el método de optimización utilizado.

Asimismo, en el capítulo 2 se desarrolla el método utilizado para análisis de flujo de carga en redes de distribución primaria.

En el Capítulo 3, se describen las características del programa computacional desarrollado (CAP89). Luego, se presentan los parámetros utilizados para el cálculo correspondiente como: secciones de conductores (mm²), resistencia (Ohm/km), reactancia (Ohm/km), susceptancia

(Mhos/km), costo de kw de pérdida de energía y costo de cada kVar instalado. También, se incluye el manual de usuario para el programa, clasificado por grupos de tarjetas.

El Capítulo 4, muestra la aplicación del programa computacional CAP89, para dos casos de alimentadores con las respectivas salidas del computador. El programa está preparado para la determinación de capacitores fijos y conmutables.

En el Capítulo 5, se describen las características del diseño de capacitores: componentes, temperatura de operación, capacidades disponibles, tipos de conexión, operación con sobrevoltajes y sobrecorriente, tipos de instalación, sistema de protección, etc. Esta información ha sido recopilada de catálogos de fabricantes y de las normas correspondientes.

Con el presente trabajo, el autor desea contribuir a la introducción de la utilización de capacitores en las redes de distribución primaria, para dar solución a problemas que actualmente se superan con alternativas en muchos casos más onerosas, desarrollándose una metodología y programa computacional que puede servir de guía en este campo dentro del desarrollo tecnológico de la Ingeniería Eléctrica en nuestro país.

Finalmente, expreso mi agradecimiento a la Empresa Regional de Servicio Público de Electricidad ELECTROLIMA S.A. por toda la colaboración en la realización de la presente tesis.

INTRODUCCION

El presente trabajo tiene el propósito de dar una nueva alternativa técnica y económica para el mejoramiento de la calidad de servicio eléctrico a nivel de distribución primaria.

Se plantea la problemática existente de redes de distribución primaria, que por sus extensos radios de influencia y/o sus regímenes de carga conllevan a tener perfiles de tensión deficientes y a un incremento de las pérdidas de potencia y energía. Convencionalmente se considera el aumento de la sección de los conductores como una forma de solución, o también la ejecución de nuevas redes que permitan, por un lado, reducir el régimen de carga, y por otro lado mejorar los perfiles de tensión.

Dentro de las tecnologías existentes se puede considerar la instalación de capacitores en las redes de distribución primaria, que permitan mejorar el perfil de tensión, reducir el pico de carga y reducir las pérdidas de potencia y energía en las redes.

Existen muchos métodos desarrollados para la aplicación

de capacitores en redes de distribución primaria. En todos ellos se plantean determinadas restricciones para el desarrollo teórico de la aplicación. Dentro de las restricciones más comunes se tienen:

- Se considera carga uniformemente distribuida a lo largo de un circuito (17,18,20).
- Se considera una única sección de conductor o una sección promedio para todo el circuito (18,20).
- No se considera la influencia de la variación de la tensión en la potencia inyectada a la red por los capacitores (10,13,17,19,20).
- No se considera el número óptimo de capacitores. (9,10,13,14,17,18,20)
- Solo se considera capacitores fijos (9,10,14,17,19)

Se trata entonces del desarrollo de un método que supera las restricciones indicadas y busque por lo tanto dar una representación más real a las redes.

Luego, el método desarrollado considera:

- Cargas distribuidas a lo largo del alimentador de diferente magnitud.
- Combinación de secciones entre cada nodo e incluso cambio de sección en enlaces (entre nodo y nodo)
- La variación de la tensión en la potencia inyectada a la red por los capacitores.
- Número óptimo de capacitores

- La posibilidad de instalar capacitores fijos y conmutables.
- Optimizar las pérdidas de potencia y energía.

Sin embargo, cabe indicar que en el presente estudio se han establecido , dentro del análisis determinadas restricciones , las que indicamos a continuación :

- Se analiza el Sistema en estado estable.
- No optimiza el tiempo de conexión de los capacitores conmutables (Switches).
- No considera la instalación de capacitores en circuitos laterales (derivaciones del alimentador troncal)
- No considera la instalación de capacitores en puntos intermedios de cada enlace (esto es posible si se define un punto determinado como nodo).

El método se basa en la definición de una función ahorro que se compone de las expresiones de cálculo de pérdidas de potencia y energía, y de los costos de los capacitores como sigue :

$$\text{Ahorro} = \text{Cte1} \times (\text{Reducción Perd.Pot}) + \text{Cte2} \times (\text{Reducción Perd.Eneg.}) - \text{Cte3} \times (\text{Costo Capacitor})$$

Las expresiones de reducción de pérdidas de potencia y energía estarán en función de sus variables H_{ci} (tamaño de capacitores) y H_{li} (localización de capacitores), por lo que la derivada de la función ahorro respecto a

e las variables nos da en los valores máximos de la misma función. Esto permite determinar cuales son los I_{ci} y H_{ci} óptimos para obtener un ahorro máximo.

CAPITULO 2 METODOLOGIA

2.1.-Configuración Topológica de las Redes de Distribución

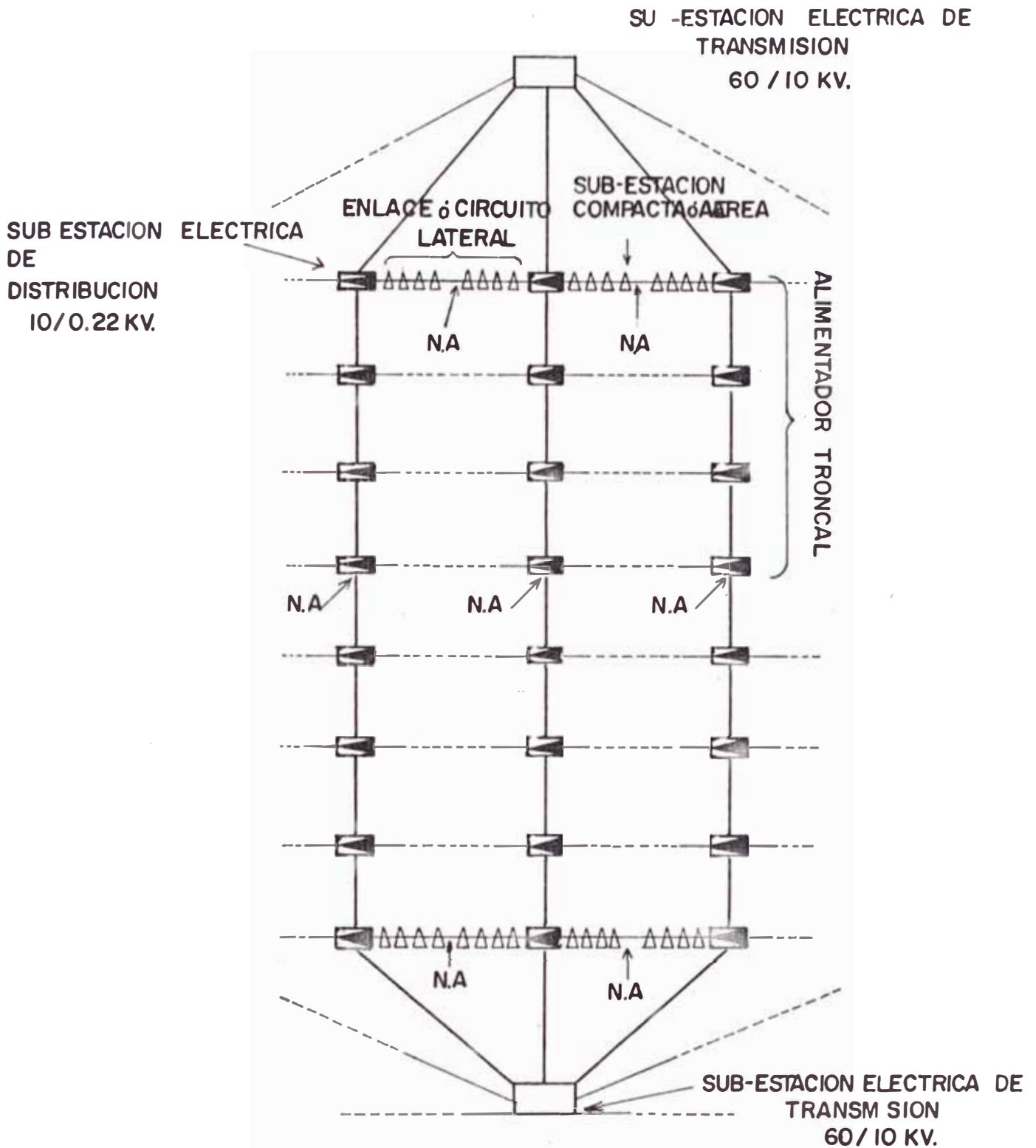
Primaria

La configuración topológica de las redes de distribución primaria normalizada en ELECTROLIMA es radial con enlaces laterales. Está conformada por una troncal que alimenta a sub-estaciones convencionales y los circuitos o enlaces laterales que alimentan su vez sub-estaciones compactas y sub-estaciones aéreas. Tanto la troncal como los laterales tienen posibilidad de ser alimentadas de otros circuitos a través de puntos normalmente abiertos. Esta configuración proporciona mayor confiabilidad al servicio dado que ante la ocurrencia de fallas es posible la normalización del servicio mediante operaciones sencillas de apertura y cierre de interruptores.

En la figura # 1 se muestra la configuración topológica normalizada de las redes. El sistema eléctrico tiene normalizado la tensión de 10 kV, trifásica con conexión delta (neutro aislado).

2.2.-Alimentador Equivalente por Unidad

La normalización de las redes de distribución primaria considera variaciones escalonadas de la sección lo



CONFIGURACION TOPOLOGIC NOR LIZADA DE LAS REDES DE DI TRIBUCION PRIMARIA

FIGURA 1

largo de un circuito, desde de la sub-estación de transmisión (la mayor sección) hasta el último tramo del mismo.

Esta característica complica el cálculo de pérdidas de energía y caída de tensión, dado que obliga a una evaluación tramo por tramo.

Sin embargo, para superar este problema se define el concepto de "Alimentador Equivalente por Unidad" como un circuito que posee una resistencia eléctrica uniforme, equivalente a la del circuito original , bajo las siguientes consideraciones:

1ro. Suponiendo un alimentador de m secciones diferentes y se considera la resistencia r_j (ohmios/km.) de la j-ésima sección como la resistencia del alimentador equivalente.

2do. Modificamos la longitud del resto de secciones para que mantenga la misma resistencia eléctrica que su original sección, mediante la siguiente expresión:

$$L_{ei} = \frac{L_i \times r_i}{r_j} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

donde

L_{ei} = Longitud equivalente de la sección i (km)

L_i = Longitud original de la sección i (km)

r_i = Resistencia original de sección i (Ohm/km)

r_j = Resistencia del alimentador equivalente.
(ohm/km)

Ver figuras 2a y 2b

3ro. La longitud total del alimentador equivalente estará dada por la sumatoria de las longitudes equivalentes de cada sección:

$$L_e = \sum_{i=1}^n \frac{L_i \cdot r_i}{r_j} \quad (2)$$

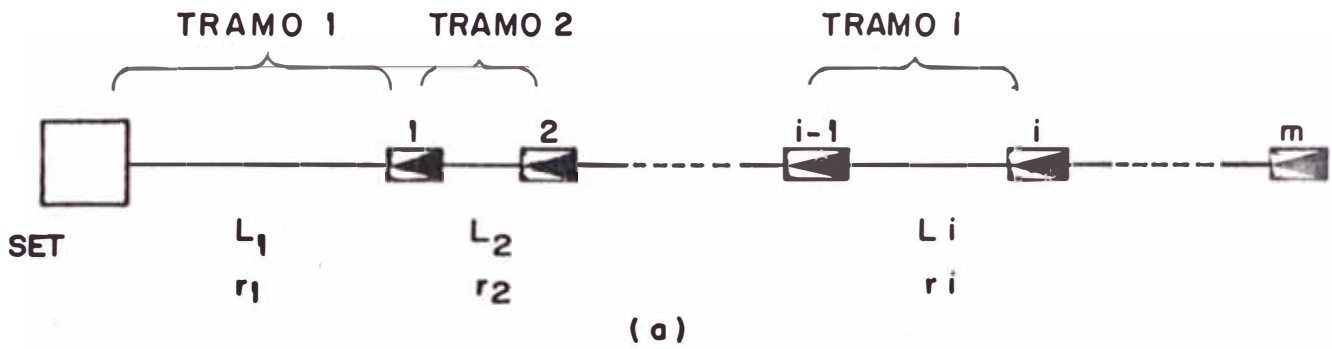
4to. Dividiendo cada tramo de longitud del alimentador equivalente entre "Le", obtendremos las longitudes por unidad que conforman el alimentador equivalente por unidad de resistencia uniforme.

5to. Finalmente, definimos la "Distancia Equivalente por Unidad" como la sumatoria de las longitudes equivalentes por unidad que preceden a un punto determinado del alimentador.

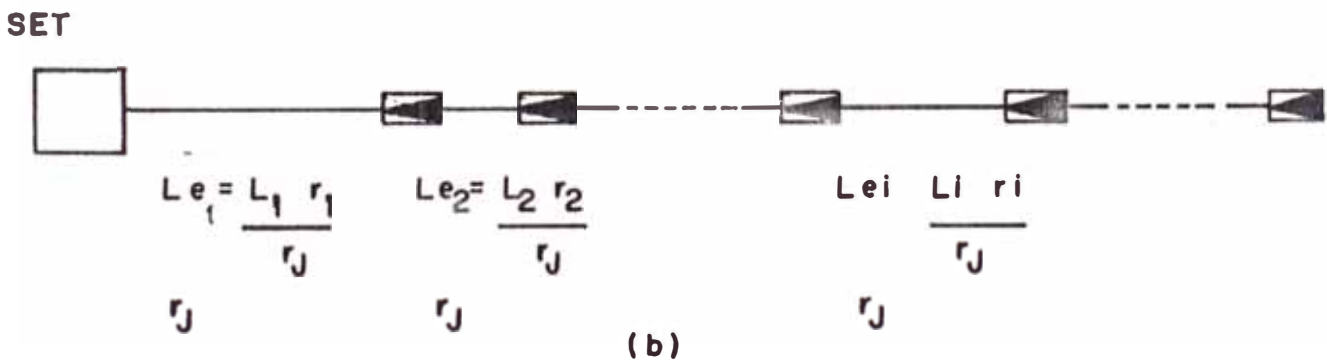
$$h_i = \sum_{n=1}^i L_{en} \quad (3)$$

2.3 Función distribución de corriente reactiva

El perfil de corriente a lo largo de un alimentador de distribución primaria, es representado a través de una función escalón. La corriente en cada tramo (conformado posiblemente con varias secciones diferentes) se mantiene constante hasta llegar a la siguiente sub-estación de



ESQUEMA UNIFILAR SIMPLIFICADO DE UN CIRCUITO



ALIMENTADOR EQUIVALENTE NIDAD - LONGITUDES
EQUIV. LENTES

distribución 10/0.22 kV., en la cual se suministra una carga determinada, fluyendo por el siguiente tramo la resultante de la sumatoria de las corrientes en dicho nodo y así consecutivamente hasta la última sub-estación.

El análisis que se expone en el presente trabajo, como se ha mencionado anteriormente, se lleva a cabo con la componente reactiva de la corriente y se define la corriente reactiva por unidad en el nodo J, como:

$$f_j = I_j / I_s \quad (4)$$

donde : I_j Corriente reactiva en la subestación j

I_s Corriente reactiva inyectada desde la Sub-Estación de Transmisión (Maxima demanda)

y la función distribución de corriente reactiva como:

$$F_j = \sum_{x=j}^1 f_x \quad (5)$$

donde : f_x Corriente por unidad nodo x

El método que se desarrolla para la optimización de la localización y tamaño de capacitores se basa en la reducción de las pérdidas de potencia y energía mediante la reducción de la componente reactiva de la corriente a lo largo del alimentador.

La contribución de la componente reactiva o en cuadratura de la corriente que fluye a lo largo de un alimentador trifásico se deduce del modo siguiente:

$$\text{Pérdidas de Potencia} = 3 \cdot (I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + \dots + I_n^2 \cdot R_n)$$

$$= 3 \sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot R_i$$

para un alimentador de n tramos

Como la corriente que fluye por cada tramos es:

$$\bar{I}_i = I_{id} + j I_{iq}$$

Luego:

$$\text{Pérdidas de Potencia} = 3 \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{I_{id}^2 + I_{iq}^2} \right)^2 \cdot R_i$$

$$= 3 \sum_{i=1}^n (I_{id}^2 \cdot R_i + I_{iq}^2 \cdot R_i)$$

Por consiguiente, reduciendo la componente I_{iq} lograremos reducir las pérdidas de potencia y energía.

2.4 Formulación para la reducción de pérdidas de Potencia y Energía

Con los conceptos definidos anteriormente de alimentador equivalente por unidad y función distribución de corriente reactiva, se calcula las pérdidas por fase de potencia y energía por efecto Joule, provocados por la componente reactiva de la corriente con la siguiente expresión:

$$P_P = \int_0^1 (I_B \cdot F(x))^2 \cdot r \cdot dx \quad (6)$$

$$P_E = \int_0^T \int_0^1 (I_s(t) \cdot F(x))^2 \cdot r \cdot dx \quad (7)$$

Estas pérdidas son las mismas a las que se obtuvieran en el circuito original de diferentes secciones.

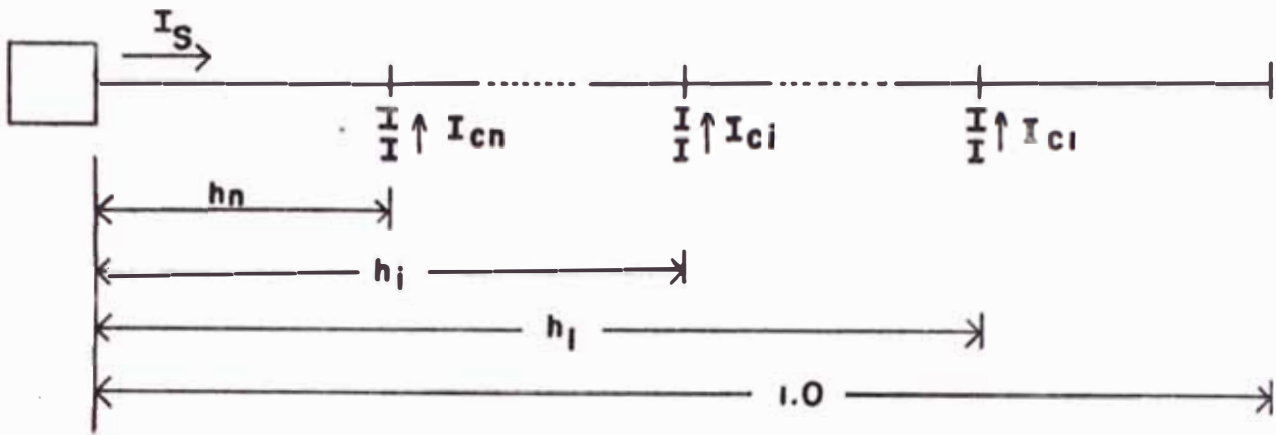
Para la reducción de estas pérdidas será necesario la inyección de corriente reactiva a lo largo del alimentador a través de la instalación de capacitores Shunt como se muestra en la figura 3. Los capacitores son numerados del final del alimentador, en forma creciente, hacia la sub-estación de transmisión, con las cuales los nuevos valores de pérdidas se obtendrán para "n" capacitores con las siguientes expresiones:

$$P_p = \int_0^{h_n} (I_s \cdot F(x) - \sum_{j=1}^n I_{c_j})^2 \cdot r \cdot dx + \sum_{i=1}^{n-1} \int_{h_{i+1}}^{h_i} (I_s \cdot F(x) - \sum_{j=1}^i I_{c_j})^2 \cdot r \cdot dx + \int_{h_1}^1 (I_s \cdot F(x))^2 \cdot r \cdot dx \quad (8)$$

$$P_e = \int_0^T \left(\int_0^{h_n} (I_s(t) \cdot F(x) - \sum_{j=1}^n I_{c_j})^2 \cdot r \cdot dx + \sum_{i=1}^{n-1} \int_{h_{i+1}}^{h_i} (I_s(t) \cdot F(x) - \sum_{j=1}^i I_{c_j})^2 \cdot r \cdot dx + \int_{h_1}^1 (I_s(t) \cdot F(x))^2 \cdot r \cdot dx \right) dt \quad (9)$$

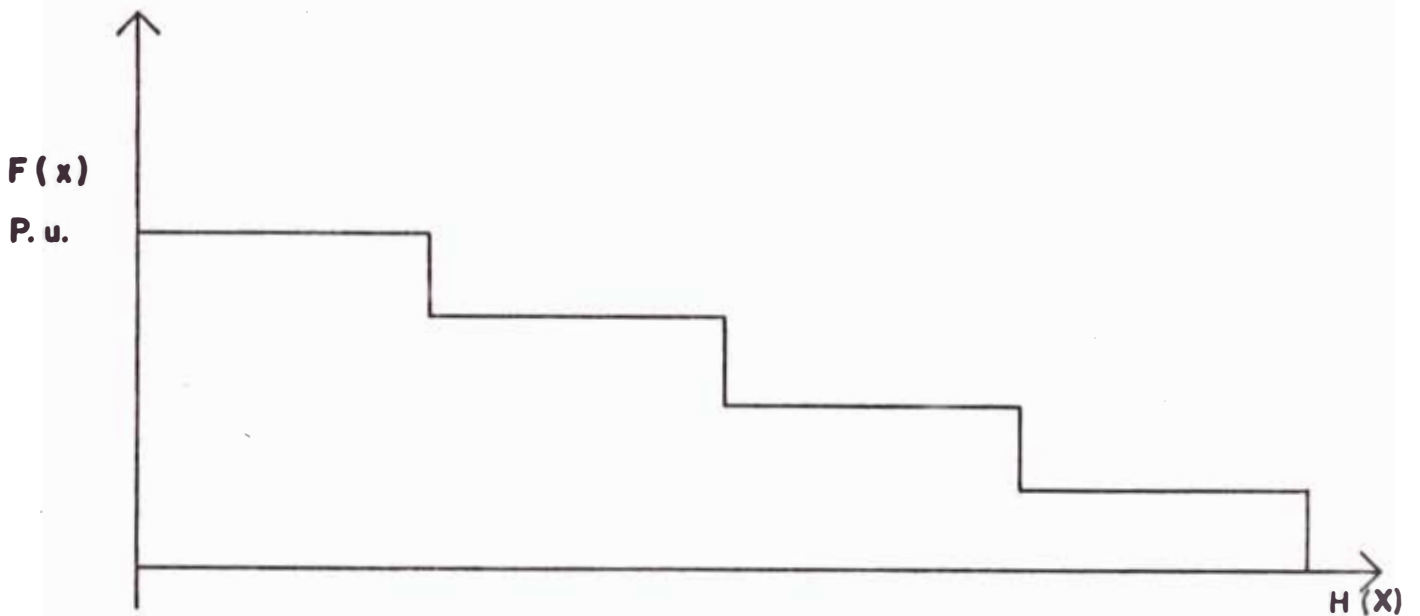
donde :

- h_i Distancia equiva nt por unidad del i-ésimo capacitor (P.U.)
- I_s Corri nt reactiva pico inyectada en la Sub-Estación de Transmisión (Amperios)



(a)

ALIMENTADOR EQUIVALENTE POR UNIDAD (DISTANCIAS)
LOCALIZACION DE CAPACITORES



(b)

FUNCION CORRIENTE REACTIVA POR UNIDAD

F(x)	Función distribución de corriente reactiva (P.U.)
r	Resistencia unitaria del alimentador equivalente (Ohmios/Km)
Ic _j	Corriente inyectada por el j-ésimo capacitor (P.U.)
I _s (t)	Variación de la corriente inyectada en el alimentador en un periodo de tiempo T
T	Período de tiempo para la evaluación de las pérdidas de energía.

La reducción de las pérdidas obtenidas utilizando los capacitores vendrían dadas por la diferencia de las expresiones 6 y 8 para las de potencia y de 7 y 9 para las de energía, como sigue:

Reducción en las Pérdidas de Potencia

$$R_{Pc} = P - P_p \quad (10)$$

Reducción en las Pérdidas de Energía

$$R_{Ec} = P - P_e \quad (11)$$

Las expresiones 10 y 11 determinan la reducción total de pérdidas gracias a la instalación de determinado número de capacitores. Sin embargo, nos interesa conocer la participación de cada uno de ellos dentro del total de reducción de pérdidas con el objeto de determinar, como se verá más adelante, el tamaño y localización óptima de cada capacitor.

Supongamos que se instalen varios capacitores a lo largo del alimentador. La reducción de las pérdidas de potencia debido al primer capacitor se determinan como

sigue:

La expresión de las pérdidas de potencia sin capacitores mostrada en (6), se puede escribir de la siguiente mane

ra:

$$P = \int_0^{h1} (I_s \cdot F(x))^2 \cdot r \cdot dx + \int_{h1}^1 (I_s \cdot F(x))^2 \cdot r \cdot dx \quad (12)$$

Siendo $h1$ la ubicación del primer capacitor $Ic1$ como se muestra en la figura 4.a.

La influencia de capacitor $Ic1$ en la función distribución de corriente reactiva es representado en la figura (4.b) con el área sombreada. La curva inferior viene a ser $(I_s F(x) - Ic1)/I_s$.

Luego, la expresión de las pérdidas de potencia con capacitores mostrada en (8) para el primer capacitor $Ic1$ será:

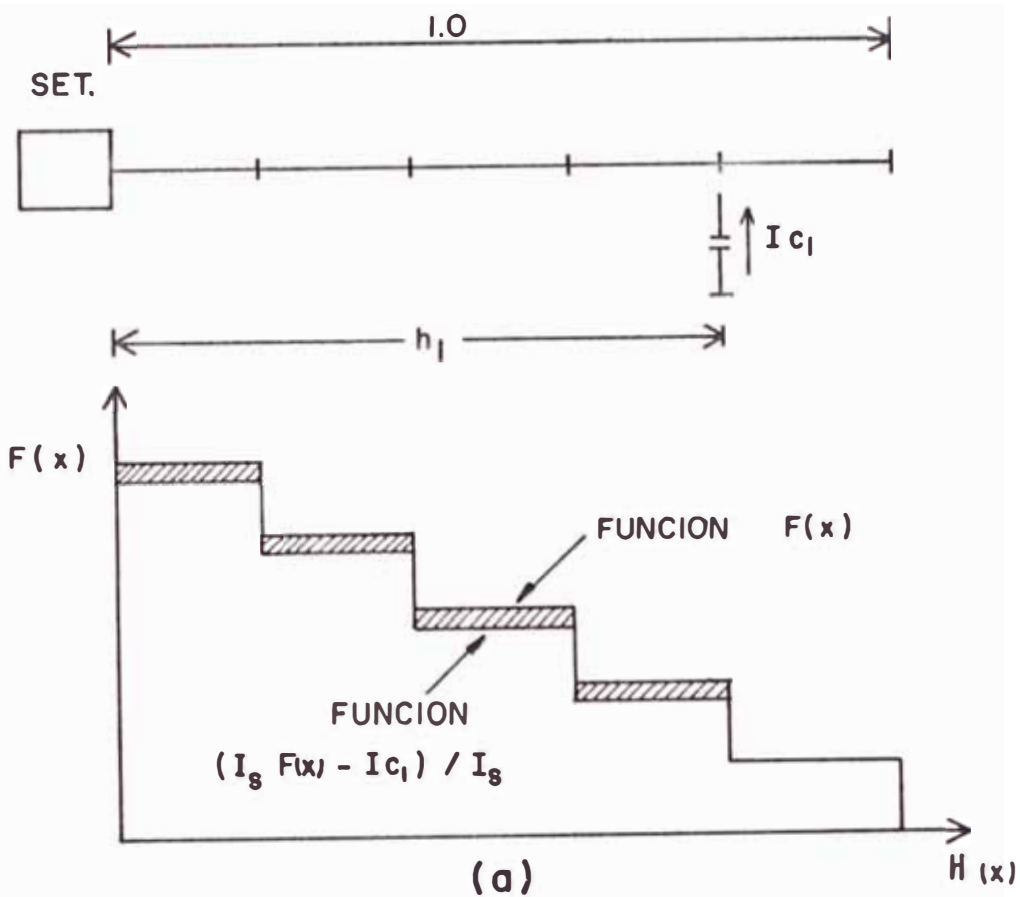
$$P_{pc1} = \int_0^{h1} (I_s \cdot F(x) - Ic1)^2 \cdot r \cdot dx + \int_{h1}^1 (I_s \cdot F(x))^2 \cdot r \cdot dx \quad (13)$$

Restando estas dos últimas expresiones ((12)-(13)) obtenemos la reducción en las pérdidas de potencia proporcionada por el capacitor $Ic1$:

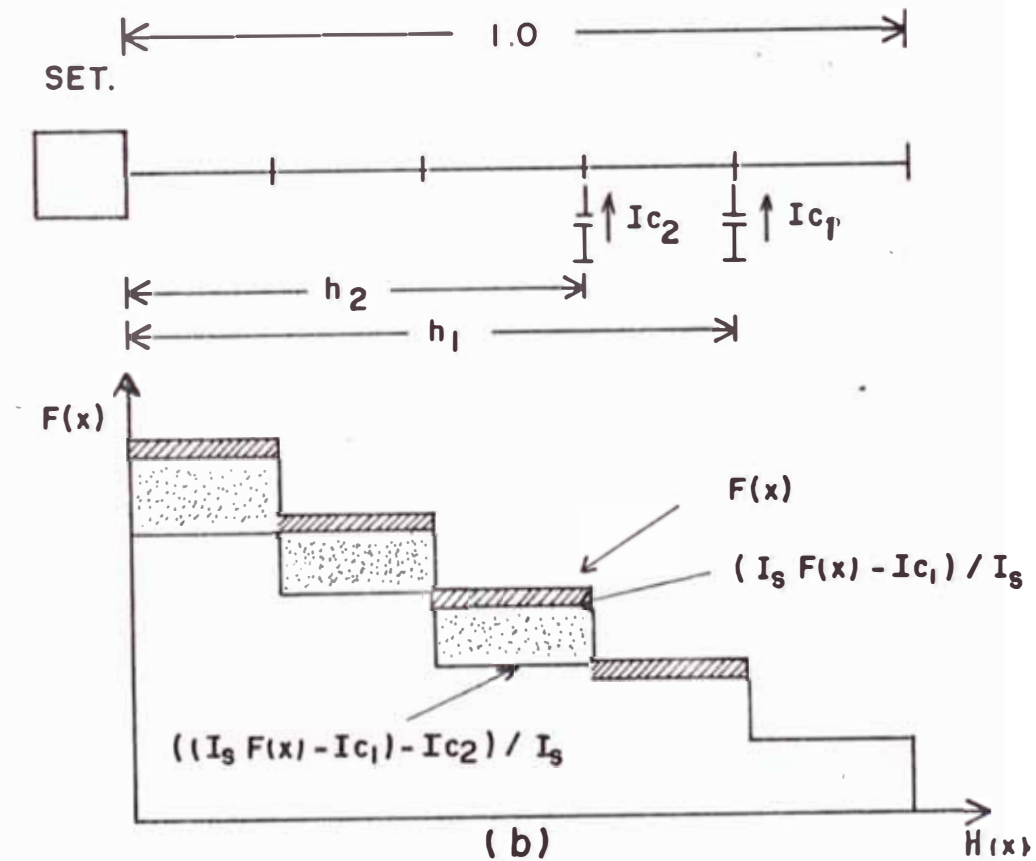
$$R_{Pc1} = \frac{P}{P} - P_{pc1}$$

$$R_{Pc1} = \int_0^{h1} (I_s \cdot F(x))^2 \cdot r \cdot dx - \int_0^{h1} (I_s \cdot F(x) - Ic1)^2 \cdot r \cdot dx$$

desarrollando el binomio del segundo sumando



UBICACION DE CAPACITORES I_{c1}



1. INFLUENCIA DE I_{c1} EN LA FUNCION CORRIENTE REACTIVA

FIGURA 4

$$RP_{c1} = \int_0^{h1} (I_s.F(x))^2 . r . dx - \left(\int_0^{h1} (I_s.F(x))^2 . r . dx + I_{c1}^2 \int_0^{h1} r . dx \right. \\ \left. - 2 . I_{c1} . \int_0^{h1} I_s . F(x) . r . dx \right)$$

Luego, simplificando:

$$RP_{c1} = 2 . I_{c1} . \int_0^{h1} I_s . F(x) . r . dx - r . h1 . I_{c1}^2$$

Asimismo, considerando la instalación de un segundo capacitor ubicado a una distancia h_2 de la sub-estación de transmisión (Ver figura 4.c) influirá en la función de distribución de corriente reactiva como se muestra en la figura 4.d. con el área punteada. En donde la curva inferior viene a ser $((I_s F(x) - I_{c1}) - I_{c2})/I_s$

Luego, la expresión de las pérdidas de potencia considerando la instalación de los capacitores I_{c1} e I_{c2} será:

$$P_{pc2} = \int_0^{h2} ((I_s.F(x) - I_{c1}) - I_{c2})^2 . r . dx + \int_{h2}^{h1} (I_s.F(x) - I_{c1})^2 . r . dx \\ + \int_{h1}^1 (I_s.F(x))^2 . r . dx \quad (14)$$

Se obtendrá el aporte adicional en la reducción de las pérdidas de potencia debido al capacitor I_{c2} restando las expresiones de las pérdidas con el capacitor I_{c1} (13) y de las pérdidas con los capacitores I_{c1} e I_{c2} (14) esto es:

$$RP_{c2} = P_{pc1} - P_{pc2}$$

donde P_{pc1} se puede escribir:

$$P_{pc1} = \int_0^{h_2} (I_s.F(x) - I_{c1})^2 \cdot r \cdot dx + \int_{h_2}^{h_1} (I_s.F(x) - I_{c1})^2 \cdot r \cdot dx + \int_{h_1}^1 (I_s.F(x))^2 \cdot r \cdot dx$$

por consiguiente:

$$R_{pc2} = \int_0^{h_2} (I_s.F(x) - I_{c1})^2 \cdot r \cdot dx - \int_0^{h_2} ((I_s.F(x) - I_{c1}) - I_{c2})^2 \cdot r \cdot dx$$

Finalmente, simplificando la expresión anterior:

$$R_{pc2} = 2 \cdot I_{c2} \cdot \int_0^{h_2} (I_s.F(x) - I_{c1}) \cdot r \cdot dx - r \cdot h_2 \cdot I_{c2}^2$$

Analogamente, considerando un tercer capacitor las pérdidas de potencia están dadas por:

$$P_{pc3} = \int_0^{h_3} ((I_s.F(x) - I_{c1} - I_{c2}) - I_{c3})^2 \cdot r \cdot dx + \int_{h_3}^{h_2} (I_s.F(x) - I_{c1} - I_{c2})^2 \cdot r \cdot dx + \int_{h_2}^{h_1} (I_s.F(x) - I_{c1})^2 \cdot r \cdot dx + \int_{h_1}^1 (I_s.F(x))^2 \cdot r \cdot dx \quad (15)$$

Se obtendrá el aporte adicional en la reducción de las pérdidas de potencia debido al capacitor I_{c3} restando las expresiones (15) y (14) :

$$R^* 3 = P_{pc2} - P_{pc3}$$

Obteniéndose

$$R_{Pc3} = 2I_{c3} \int_0^{h3} (I_s F(x) - (I_{c1} + I_{c2})) \cdot r dx - r \cdot h3 \cdot I_{c3}^2$$

En general se tendrá que el aporte en la reducción de las pérdidas de potencia de i-ésimo capacitor será:

$$R_{Pci} = 2 \cdot r \cdot I_{ci} \int_0^{hi} (I_s \cdot F(x) - \sum_{k=1}^{i-1} I_{ck}) \cdot dx - r \cdot hi \cdot I_{ci}^2 \quad (17)$$

La determinación de aporte en la reducción de la pérdida de energía se obtendrá de la siguiente forma:

$$R_{Eci} = \int_0^T (2 \cdot r \cdot I_{ci} \int_0^{hi} (I_s \cdot F(x) - \sum_{k=1}^{i-1} I_{ck}) \cdot dx - r \cdot hi \cdot I_{ci}^2) \cdot dt$$

o también

$$R_{Eci} = \int_0^T (2 \cdot r \cdot I_{ci} (\int_0^{hi} I_s \cdot F(x) - \int_0^{hi} \sum_{k=1}^{i-1} I_{ck} \cdot dx)) \cdot dt - \int_0^T r \cdot hi \cdot I_{ci}^2 \cdot dt$$

$$R_{Eci} = \int_0^T (2 \cdot r \cdot I_{ci} (\int_0^{hi} I_s \cdot F(x) - hi \cdot \sum_{k=1}^{i-1} I_{ck})) \cdot dt - r \cdot hi \cdot I_{ci}^2 \cdot T$$

$$R_{Eci} = 2 \cdot r \cdot I_{ci} \int_0^T \int_0^{hi} I_s(t) \cdot F(x) \cdot dx \cdot dt - 2 \cdot r \cdot I_{ci} \cdot hi \sum_{k=1}^{i-1} I_{ck} \int_0^T dt - r \cdot hi \cdot I_{ci}^2 \cdot T \quad (18)$$

luego el factor de carga reactiva en un período T de $I_s(t)$ será:

$$FC = \int_0^T \frac{I_s(t) \cdot dt / T}{I_s} \quad (19)$$

siendo I_s = el valor de máxima demanda en el período T
reemplazando (19) en (18).

$$REci = 2 \cdot r \cdot Ici \cdot FC \cdot I_s \cdot T \int_0^{hi} F(x) \cdot dx - 2 \cdot r \cdot Ici \cdot T \cdot hi \sum_{k=1}^{i-1} Ick - r \cdot hi \cdot Ici \cdot T \quad (20)$$

Observar que el término I_s de las expresiones R_{Pi} (17) y RE_{ci} (20) es el mismo puesto R_{Pi} se evalúa en horas de máxima demanda.

Luego de la determinación de las reducciones de potencia y energía, definimos la Función ahorro económico por la instalación de capacitores, como la función que valoriza la reducción de las pérdidas de potencia y de energía y los costos de instalación. Esta viene dada por la siguiente expresión:

$$A = K_p \cdot R_{Pc} + K_e \cdot R_{Ec} - K_c \sum_{i=1}^n Ici \quad (21)$$

donde:

K_p = Costo del KW de pérdida de potencia

R_{Pc} = Reducción de las pérdidas totales de potencia con la instalación de capacitores

K_e = Costo del KW-HR de pérdida de energía con la instalación de capacitores

R_{Ec} = Reducción de las pérdidas totales de energía con la instalación de capacitores

K_c = Costo de cada KVAR instalado

I_{ci} = Capacidad del i -ésimo capacitor

siendo

$$R_{Pc} = \sum_{i=1}^n R_{Pci} \quad \text{para } n \text{ capacitores} \quad (22)$$

$$R_{Ec} = \sum_{i=1}^n R_{Eci} \quad \text{para } n \text{ capacitores} \quad (23)$$

Cabe indicar que el costo de la reducción de las pérdidas de energía y potencia debe de ser llevado a valor presente para ser introducido en la expresión de Ahorro para lo cual se utiliza el factor de actualización definido de la siguiente manera:

$$Fac = \frac{(1+i)^{-n}}{i(1+i)^n}$$

donde

i = tasa de interés de capital $i = 0.11$

n = tiempo de amortización del capital

La instalación de capacitores considerando el beneficio económico por la reducción de pérdidas de potencia y energía es uno de los objetivos del presente trabajo. La función ahorro, como se ha indicado, se deduce de las expresiones de cálculo de reducción de pérdidas de potencia y energía, y de los costos de instalación de los bancos de capacitores. De ellos la reducción de pérdidas serán afectadas por el factor de actualización dado que éstas se van acumulando a lo largo de los años.

La instalación de capacitores, adicionalmente a la reducción de pérdidas de potencia y energía, proporcionan beneficios por: alivio de la capacidad del sistema, reducción de la potencia reactiva, y mejoramiento de los perfiles de tensión. Todo esto representa también un beneficio económico que en el presente estudio no se evalúan.

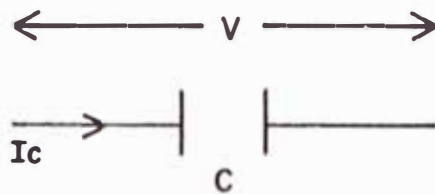
La reducción de las pérdidas de potencia por la instalación de capacitores implica reducción de la potencia generada, la cual se puede cuantificar conociendo el costo de 1 Kw. generado (ver el capítulo 3 acápite 3.1.2).

Asimismo, la instalación de capacitores implica la reducción de las pérdidas de energía en el sistema, y se puede evaluar el beneficio conociendo el costo de cada Kwhr de pérdida de energía (ver capítulo 3 acáp.3.1.2).

Para la construcción de la función Ahorro conviene observar los siguientes puntos:

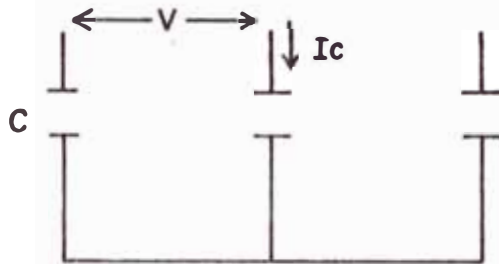
- Como se ha indicado, las pérdidas de potencia y energía calculadas con la expresión (6) y (7) corresponden al equivalente monofásico de la red trifásica. Asimismo la evaluación de las pérdidas de potencia y energía con la utilización de capacitores indicados las expresiones (8) y (9) corresponden al equiva

CONEXION I-FASE



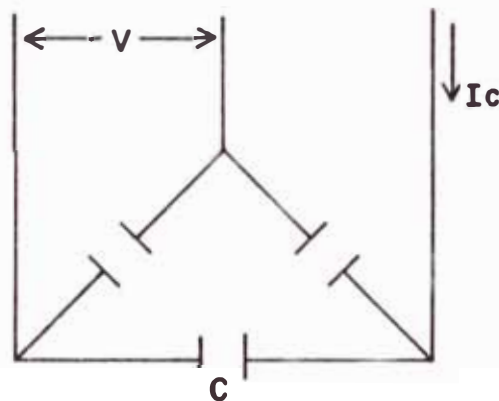
$$Q_c = W C V^2 \times 10^{-3}$$
$$Q_c = I_c V$$

CONEXION TRIFASICA EN ESTRELLA



$$Q_c = \frac{W C V^2}{\sqrt{3}} \times 10^{-3}$$
$$Q_c = \sqrt{3} I_c V$$

CONEXION TRIFASICA EN DELTA



$$Q_c = 3 W C V^2 \times 10^{-3}$$
$$Q_c = \sqrt{3} I_c V$$

DONDE

- f** FRECUENCIA (H z)
- C** CAPACITANCIA (u f)
- Qc** POTENCIA REACTIVA (Kvar)
- V** VOLTAJE (KV.)
- Ic** CORRIENTE (Amp.)

CONEXION DE CAPACITORES

FIGURA 5

lente monofásico. Por tal motivo la reducción de las pérdidas del circuito trifásico será:

$$R_{Pc} = \frac{3}{3\phi} R_{Pc}$$

$$R_{Ec} = \frac{3}{3\phi} R_{Ec}$$

donde R_{Pc} y R_{Ec} son las reducciones de pérdidas expresadas en (22) y (23).

- Las corrientes de línea entregadas por los capacitores, sea su conexión en delta o estrella, serán multiplicadas por $\sqrt{3}$ y por la tensión para obtener la potencia 3ϕ del banco de capacitores (ver figura 5).

2.5 Problemas de Optimización

Definida la Función Ahorro para la instalación de capacitores, consideramos que ésta tendrá un punto máximo para determinadas ubicaciones y tamaños de los capacitores.

Luego, para este punto de máximo valor la tangente a la curva es a cero, es decir se tendrá que la derivada de la función para un valor determinado de H_i o I_{ci} será igual a cero.

2.5.1 Localización Óptima de los Capacitores

Se obtendrá la localización óptima de cada capacitor mediante un método de derivadas parciales, derivando la función Ahorro (21) con respecto a la localización de i -ésimo capacitor e igualando a cero:

$$\frac{\delta A}{\delta h_i} = K_p \frac{\delta R_{Pc}}{\delta h_i} + K_e \frac{\delta R_{Ec}}{\delta h_i} + K_c \frac{\delta \sum_{k=1}^n I_{ck}}{\delta h_i} = 0 \quad (24)$$

Considerando que:

$$R_{Pc} = \sum_{i=1}^n R_{Pci}$$

$$R_{Pc} = R_{Pc1} + R_{Pc2} + \dots + R_{Pci} + \dots + R_{Pcn}$$

donde

$$\left. \frac{\delta R_{Pcj}}{\delta h_i} \right|_{j \neq i} = 0 \quad (\text{ver expresión 17})$$

Entonces:

$$\frac{\delta R_{Pc}}{\delta h_i} = \frac{\delta R_{Pci}}{\delta h_i} \quad (25)$$

Luego, derivando respecto a h_i la expresión (17) que representa la reducción de las pérdidas de potencia debido al capacitor I_{ci} , se tiene:

$$\frac{\delta R_{Pci}}{\delta h_i} = 2 \cdot r \cdot I_{ci} \left(I_{s.F(x)} - \sum_{k=1}^{i-1} I_{ck} \right) - r \cdot I_{ci} \quad (26)$$

Analogamente:

$$R_{Ec} = \sum_{i=1}^n R_{Eci}$$

donde

$$\left. \frac{\delta R_{Ecj}}{\delta h_i} \right|_{j \neq i} = 0$$

Entonces

$$\frac{\delta R_{Ec}}{\delta h_i} = \frac{\delta R_{Eci}}{\delta h_i} \quad (27)$$

Luego, derivando respecto a h_1 la expresión (20) que representa la reducción de las pérdidas de energía debido al capacitor I_{c1} , se tiene:

$$\frac{\partial R_{E_{c1}}}{\partial h_1} = T \cdot (2 \cdot r \cdot I_{c1} \cdot I_s \cdot (FC \cdot F(h_1)) - \sum_{k=1}^{i-1} \frac{I_{ck}}{I_s}) - r \cdot I_{c1}^2 \quad (28)$$

Reemplazando las expresiones (26) y (28) en (24):

$$\begin{aligned} & K_p (2 \cdot r \cdot I_{c1} \cdot (I_s \cdot F(h_1)) - \sum_{k=1}^{i-1} I_{ck}) - r \cdot I_{c1}^2 \\ & + K_e (T (2 \cdot r \cdot I_{c1} \cdot I_s \cdot (FC \cdot F(h_1)) - \sum_{k=1}^{i-1} \frac{I_{ck}}{I_s}) - r \cdot I_{c1}^2) \\ & = 0 \end{aligned}$$

luego:

$$\begin{aligned} & K_p \cdot 2r \cdot I_{c1} \cdot (I_s \cdot F(h_1)) - K_p \cdot 2r \cdot I_{c1} \sum_{k=1}^{i-1} I_{ck} - K_p \cdot r \cdot I_{c1}^2 \\ & + K_e \cdot T \cdot 2r \cdot I_{c1} \cdot I_s \cdot FC \cdot F(h_1) - K_e \cdot T \cdot 2r \cdot I_{c1} \cdot I_s \sum_{k=1}^{i-1} \frac{I_{ck}}{I_s} \\ & - K_e \cdot T \cdot r \cdot I_{c1}^2 = 0 \end{aligned}$$

$$(K_p + K_e \cdot T \cdot FC) \cdot 2r \cdot I_{c1} \cdot I_s \cdot F(h_1) = (K_p + K_e \cdot T) \cdot r \cdot I_{c1}^2$$

$$+ (K_p + K_e \cdot T) \cdot 2r \cdot I_{c1} \sum_{k=1}^{i-1} I_{ck}$$

Finalmente, despejando $F(h_1)$:

$$F(h_1) = \frac{(K_p + K_e \cdot T)}{(K_p + K_e \cdot T \cdot FC)} \left(\frac{I_{c1}}{2I_s} + \sum_{k=1}^{i-1} \frac{I_{ck}}{I_s} \right) \quad (29)$$

donde:

donde:

h_i es la localización óptima d. capacitor "i"

$F(h_i)$ es la función corriente reactiva para el i-ésimo capacitor ubicado en h_i .

2.5.2 Tamaño Óptimo de los Capacitores

Se obtendrá el tamaño óptimo de cada capacitor mediante el método de derivadas parciales, derivando la función Ahorro (21) con respecto al tamaño del i-ésimo capacitor e igualando a cero:

$$\frac{\delta A}{\delta I_{ci}} = k_p \frac{\delta R_{pc}}{\delta I_{ci}} + k_e \frac{\delta R_{ec}}{\delta I_{ci}} - k_c \frac{\delta \sum_{k=1}^n I_{ck}}{\delta I_{ci}} = 0 \quad (30)$$

dado que

$$\frac{\delta \sum_{k=1}^n I_{ck}}{\delta I_{ci}} = \frac{\delta I_{c1}}{\delta I_{ci}} + \frac{\delta I_{c2}}{\delta I_{ci}} + \dots + \frac{\delta I_{cn}}{\delta I_{ci}} = 1$$

La expresión (30) se reduce a:

$$\frac{\delta A}{\delta I_{ci}} = k_p \frac{\delta R_{pc}}{\delta I_{ci}} + k_e \frac{\delta R_{ec}}{\delta I_{ci}} - k_c$$

y reemplazando las expresiones (22) y (23)

$$\frac{\delta A}{\delta I_{ci}} = k_p \left(\frac{\delta R_{pc1}}{\delta I_{ci}} + \frac{\delta R_{pc2}}{\delta I_{ci}} + \dots + \frac{\delta R_{pcn}}{\delta I_{ci}} \right) +$$

$$K_e \left(\frac{\delta R_{Ec1}}{\delta I_{c1}} + \frac{\delta R_{Ec2}}{\delta I_{c1}} + \dots + \frac{\delta R_{Ecn}}{\delta I_{c1}} \right) + K_c = 0 \quad (31)$$

La ecuación (31) se aplicará para los n capacitores que se desee instalar, obteniéndose n ecuaciones con n incógnitas.

Seguidamente se procederá a reemplazar las expresiones correspondientes a R_{Pc} y R_{Ec} , pero antes conviene hacer las siguientes observaciones:

-En el cálculo de R_{Pci} y R_{Eci} definidas en (17) y (20) se aprecia que influye (con signo negativo) en el mismo, la presencia de los capacitores instalados en puntos más alejados de la Sub-Estación de Transmisión. Es decir la derecha del i-ésimo capacitor en la figura 3a.

Esto es perfectamente comprensible, si se considera que el aporte en la reducción de las pérdidas proporcionado por el i-ésimo capacitor se dará en los tramos del alimentador precedentes a la ubicación del i-ésimo capacitor (a la izquierda en la figura 3a.) por donde también fluye la corriente inyectada por los otros capacitores y cuyo aporte ya ha sido considerado.

-Por consiguiente la derivada respecto a I_{cj} de

las expresiones RP_{ci} y RE_{ci} , que son los aportes en la reducción de pérdidas del i -ésimo capacitor, tendrá el valor de cero para $j > i$.

Luego, derivando la función RP_{ci} (17) respecto a cada uno de los capacitores, se tendrá:

$$j < i \quad \delta RP_{ci} / \delta I_{cj} = -2.r.h_i.I_{ci}$$

$$j = i \quad \delta RP_{ci} / \delta I_{cj} = 2.r. \int_0^{h_i} I_{s.F(x)}.dx -$$

$$2.r.h_i \sum_{k=1}^i I_{ck}$$

$$j > i \quad \delta RP_{ci} / \delta I_{cj} = 0$$

Analogamente, derivando la función RE_{ci} (20), respecto a cada uno de los capacitores, se tendrá:

$$j < i \quad \delta RE_{ci} / \delta I_{cj} = -2.r.h_i.I_{ci}.T$$

$$j = i \quad \delta RE_{ci} / \delta I_{cj} = T(2.r.F.C. \int_0^{h_i} I_{s.F(x)}.dx -$$

$$2.r.h_i. \sum_{k=1}^i I_{ck}$$

$$j > i \quad \delta RE_{ci} / \delta I_{cj} = 0$$

Suponiendo la instalación de 3 capacitores se obtendrá las derivadas parciales de las funciones RP_c y RE_c respecto a cada capacitor y

finalmente las reemplazamos en la expresión (31):

Para el primer capacitor se calculará su aporte de la reducción de pérdidas de potencia como sigue:

$$RP_{c1} = 2.r.I_{c1} \int_0^{h1} I_b.F(x).dx - r.h1.I_{c1}^2$$

derivando respecto a I_{c1}

$$\delta RP_{c1} / \delta I_{c1} = 2.r \int_0^{h1} I_b.F(x).dx - 2.r.h1.I_{c1}$$

derivando respecto a I_{c2}

$$\delta RP_{c1} / \delta I_{c2} = 0$$

derivando respecto a I_{c3}

$$\delta RP_{c1} / \delta I_{c3} = 0$$

Para el segundo capacitor se calculará su aporte en la reducción de pérdidas de potencia como sigue:

$$RP_{c2} = 2.r.I_{c2} \int_0^{h2} (I_b.F(x) - I_{c1}).dx - r.h2.I_{c2}^2$$

derivando respecto a I_{c1}

$$\delta RP_{c2} / \delta I_{c1} = -2.r.h2.I_{c2}$$

derivando respecto a I_{c2}

$$\delta RP_{c2} / \delta I_{c2} = 2.r \int_0^{h2} I_b.F(x).dx - 2.r.h2.(I_{c1} + I_{c2})$$

derivando respecto a I_{c3}

$$\delta RP_{c2} / \delta I_{c3} = 0$$

Para el tercer capacitor se calculará su aporte

en la reducción de pérdidas de potencia como sigue:

$$RPc3 = \frac{2 \cdot Ic3 \cdot r \cdot \int_0^{h3} (Ib \cdot F(x) - (Ic1 + Ic2)) \cdot dx}{r \cdot h3 \cdot Ic3}$$

derivando respecto a Ic1 :

$$\delta RPc3 / \delta Ic1 = -2 \cdot r \cdot h3 \cdot Ic3$$

derivando respecto a Ic2 :

$$\delta RPc3 / \delta Ic2 = -2 \cdot r \cdot h3 \cdot Ic3$$

derivando respecto a Ic3

$$\delta RPc3 / \delta Ic3 = \frac{2 \cdot r \cdot \int_0^{h3} Ib \cdot F(x) \cdot dx}{2 \cdot r \cdot h3 \cdot (Ic1 + Ic2 + Ic3)}$$

Luego, para el primer capacitor se calcula su aporte en la reducción de pérdidas de energía como sigue:

$$REc1 = \frac{2 \cdot r \cdot Ic1 \cdot FC \cdot Ib \cdot T \cdot \int_0^{h1} F(x) \cdot dx}{2} - r \cdot h1 \cdot Ic1 \cdot T$$

derivando respecto a Ic1 :

$$\delta REc1 / \delta Ic1 = T \cdot (2 \cdot r \cdot FC \cdot \int_0^{h1} Ib \cdot F(x) \cdot dx - 2r \cdot h1 \cdot Ic1)$$

derivando respecto a Ic2 :

$$\delta REc1 / \delta Ic2 = 0$$

derivando respecto a Ic3 :

$$\delta REc1 / \delta Ic3 = 0$$

Para el segundo capacitor se calcula su aporte en la reducción de pérdidas de energía como sigue:

$$REc2 = \frac{2 \cdot r \cdot Ic2 \cdot FC \cdot Ib \cdot T \cdot \int_0^{h2} F(x) \cdot dx}{2} - 2 \cdot r \cdot Ic2 \cdot h2 \cdot T \cdot Ic1 - r \cdot h2 \cdot Ic2 \cdot T$$

derivando respecto a I_{c1} :

$$\delta RE_{c2} / \delta I_{c1} = -2.r.I_{c2}.h^2.T$$

derivando respecto a I_{c2}

$$\delta RE_{c2} / \delta I_{c2} = T.(2.r.FC.\int_0^{h^2} I_b.F(x).dx - 2.r.h^2.(I_{c1} + I_{c2}))$$

derivando respecto a I_{c3} :

$$\delta RE_{c2} / \delta I_{c3} = 0$$

Para el tercer capacitor se calcula su aporte en la reducción de pérdidas de energía :

$$RE_{c3} = 2.r.I_{c3}.FC.I_b.T.\int_0^{h^3} F(x).dx - 2.r.I_{c3}.h^3.T.(I_{c1}+I_{c2}) - r.h^3.I_{c3}^2.T$$

derivando respecto a I_{c1} :

$$\delta RE_{c3} / \delta I_{c1} = -2.r.h^3.I_{c3}.T$$

derivando respecto a I_{c2} :

$$\delta RE_{c3} / \delta I_{c2} = -2.r.h^3.I_{c3}.T$$

derivando respecto a I_{c3} :

$$\delta RE_{c3} / \delta I_{c3} = T.(2.r.FC.\int_0^{h^3} I_b.F(x).dx - 2.r.h^3.(I_{c1} + I_{c2} + I_{c3}))$$

Para obtener el valor óptimo del primer capacitor I_{c1} , reemplazaremos las derivadas parciales correspondientes en la ecuación (31)

$$\frac{\delta A}{\delta I_{c1}} = K_p \left(\frac{R_{Pc1}}{I_{c1}} + \frac{R_{Pc2}}{I_{c1}} + \frac{R_{Pc3}}{I_{c1}} \right) + K_e \left(\frac{R_{Ec1}}{I_{c1}} + \frac{R_{Ec2}}{I_{c1}} + \frac{R_{Ec3}}{I_{c1}} \right) - K_c = 0$$

Reemplazando

$$K_p \left(2r \int_0^{h1} I_s \cdot F(x) \cdot dx - 2 \cdot r \cdot h1 \cdot I_{c1} \right) + (-2 \cdot r \cdot h2 \cdot I_{c2}) + (-2 \cdot r \cdot h3 \cdot I_{c3}) + K_e \left(2 \cdot r \cdot T \cdot FC \int_0^{h1} I_s \cdot F(x) \cdot dx - 2 \cdot r \cdot h1 \cdot T \cdot I_{c1} \right) + (-2 \cdot r \cdot I_{c2} \cdot h2 \cdot T) + (-2 \cdot r \cdot h3 \cdot I_{c3} \cdot T) - K_c = 0$$

Luego, agrupando

$$K_p \left(2r \int_0^{h1} I_s \cdot F(x) \cdot dx - 2 \cdot r \cdot (h1 I_{c1} + h2 I_{c2} + h3 I_{c3}) \right) + K_e \left(2 \cdot r \cdot T \cdot FC \int_0^{h1} I_s \cdot F(x) \cdot dx - 2 \cdot r \cdot T \cdot (h1 \cdot I_{c1} + h2 \cdot I_{c2} + h3 \cdot I_{c3}) \right) - K_c = 0$$

Finalmente :

$$h1 \cdot I_{c1} + h2 \cdot I_{c2} + h3 \cdot I_{c3} = \frac{K_p + K_e \cdot T \cdot FC}{K_p + T \cdot K_e} \int_0^{h1} I_s \cdot F(x) \cdot dx - \frac{K_c}{2 \cdot r \cdot (K_p + T \cdot K_e)} \quad (32)$$

Similarmen e, para el valor óptimo del capacitor

I_{c2} se tendrá :

$$\frac{\delta A}{\delta I_{c2}} = K_p \left(\frac{\delta R_{Pc1}}{\delta I_{c2}} + \frac{\delta R_{Pc2}}{\delta I_{c2}} + \frac{\delta R_{Pc3}}{\delta I_{c2}} \right)$$

$$+ K_e \left(\frac{\delta R_{Ec1}}{\delta I_{c2}} + \frac{\delta R_{Ec2}}{\delta I_{c2}} + \frac{\delta R_{Ec3}}{\delta I_{c2}} \right) - K_c = 0$$

Reemplazando

$$K_p \left(2r \cdot \int_0^{h^2} I_B \cdot F(x) \cdot dx - 2 \cdot r \cdot h^2 (I_{c1} + I_{c2}) + (-2rh^3 I_{c3}) \right) \\ + K_e \left(2 \cdot r \cdot T \cdot FC \cdot \int_0^{h^2} I_B \cdot F(x) \cdot dx - 2 \cdot r \cdot h^2 \cdot T \cdot (I_{c1} + I_{c2}) \right. \\ \left. + (-2 \cdot r \cdot h^3 \cdot I_{c3} \cdot T) \right) - K_c = 0$$

Luego,

$$K_p \left(2r \cdot \int_0^{h^2} I_B \cdot F(x) \cdot dx - 2 \cdot r \cdot (h^2 I_{c1} + h^2 I_{c2} + h^3 I_{c3}) \right) \\ + K_e \left(2 \cdot r \cdot T \cdot FC \cdot \int_0^{h^2} I_B \cdot F(x) \cdot dx - 2 \cdot r \cdot T \cdot (h^2 \cdot I_{c1} + \right. \\ \left. + h^2 \cdot I_{c2} + h^3 \cdot I_{c3}) \right) - K_c = 0$$

Finalmente

$$h^2 \cdot I_{c1} + h^2 \cdot I_{c2} + h^3 \cdot I_{c3} = \left(\frac{K_p + K_e \cdot T \cdot FC}{K_p + T \cdot K_e} \right) \int_0^{h^2} I_B \cdot F(x) \cdot dx \\ - \frac{K_c}{2 \cdot r \cdot (K_p + T \cdot K_e)} \quad (33)$$

Luego, para obtener el valor óptimo del capacitor I_{c3} se tendrá :

$$\frac{\delta A}{\delta I_{c3}} = K_p \left(\frac{\delta R_{Pc1}}{\delta I_{c3}} + \frac{\delta R_{Pc2}}{\delta I_{c3}} + \frac{\delta R_{Pc3}}{\delta I_{c3}} \right)$$

$$+ K_e \left(\frac{\delta R_{Ec1}}{\delta I_{c3}} + \frac{\delta R_{Ec2}}{\delta I_{c3}} + \frac{\delta R_{Ec3}}{\delta I_{c3}} \right) - K_c = 0$$

Reemplazando

$$K_p \left(2r \int_0^{h_3} I_B \cdot F(x) \cdot dx - 2 \cdot r \cdot h_3 (I_{c1} + I_{c2} + I_{c3}) \right) + K_e \left(2 \cdot r \cdot T \cdot FC \cdot \int_0^{h_3} I_B \cdot F(x) \cdot dx - 2 \cdot r \cdot h_3 \cdot T \cdot (I_{c1} + I_{c2} + I_{c3}) \right) - K_c = 0$$

Luego,

$$K_p \left(2r \int_0^{h_3} I_B \cdot F(x) \cdot dx - 2 \cdot r \cdot (h_3 I_{c1} + h_3 I_{c2} + h_3 I_{c3}) \right) + K_e \left(2 \cdot r \cdot T \cdot FC \cdot \int_0^{h_3} I_B \cdot F(x) \cdot dx - 2 \cdot r \cdot T \cdot (h_3 \cdot I_{c1} + h_3 \cdot I_{c2} + h_3 \cdot I_{c3}) \right) - K_c = 0$$

Finalmente

$$h_3 \cdot I_{c1} + h_3 \cdot I_{c2} + h_3 \cdot I_{c3} = \left(\frac{K_p + K_e \cdot T \cdot FC}{K_p + T \cdot K_e} \right) \int_0^{h_3} I_B \cdot F(x) \cdot dx - \frac{K_c}{2 \cdot r \cdot (K_p + T \cdot K_e)} \quad (34)$$

Las expresiones (32), (33) y (34) constituyen un conjunto de 3 ecuaciones con 6 incognitas, y que podemos escribir :

$$\begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_2 & h_2 & h_3 \\ h_3 & h_3 & h_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c1} \\ I_{c2} \\ I_{c3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} FACI \int_0^{h_1} I_B \cdot F(x) dx - FACII \\ FACI \int_0^{h_2} I_B \cdot F(x) dx - FACII \\ FACI \int_0^{h_3} I_B \cdot F(x) dx - FACII \end{bmatrix}$$

donde

h_1, h_2, h_3 Localizaciones de capacitores (incognitas)

I_{c1}, I_{c2}, I_{c3} Tamaño de Capacitores (incognitas)

$$FACI \quad (Kp + Ke.T.FC) / (Kp + T.Ke)$$

$$FACII \quad Kc / 2.r. (Kp+T.Ke)$$

Generalizando para "n" capacitores se tendrá:

$$\begin{bmatrix} h1 & h2 & \dots & hn \\ h2 & h2 & \dots & hn \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ hn & hn & \dots & hn \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ic1 \\ Ic2 \\ \dots \\ Icn \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} FACI \int_0^{h1} Is.F(x)dx - FACII \\ FACI \int_0^{h2} Is.F(x)dx - FACII \\ \dots \\ FACI \int_0^{hn} Is.F(x)dx - FACII \end{bmatrix} \quad (35)$$

En este conjunto de "n" ecuaciones, h1, h2,, hn son variables calculadas previamente mediante la expresión (29) , y Ic1, Ic2,, Icn son incognitas a ser calculadas:

$$\begin{aligned} [H] [Ic] &= [CTE] \\ [Ic] &= [H]^{-1} [CTE] \end{aligned} \quad (36)$$

donde :

- [H] Matriz Localización óptima
- [Ic] Matriz Tamaño óptimo
- [CTE] Matriz de elementos Constantes

2.5.3 Optimización de Capacitores Conmutables

Para la deducción de la expresión del cálculo de reducción de energía por el uso de capacitores(20), se ha considerado que estos no varían con el tiempo, es decir que son capacitores fijos, por ello que el termino

integral $\int_0^T |I_{ci}|^2 dx$ es considerado constante (ver expresión (18)).

Esta consideración solo es real para cuando se analice el sistema en mínima demanda. Sin embargo para el caso de máxima demanda, en el cual es lógico suponer se requerirá mayor inyección de reactivos para compensar la carga, la consideración mencionada no será válida, por lo que la expresión (20) no se ajustará realmente a la reducción de las pérdidas de energía con capacitores. La reducción será mayor en la medida que las unidades de capacitores conmutables sean conectados al sistema.

Se tiene la reducción de la potencia en máxima demanda como sigue :

$$RP_{ci}^{MD} = P_{p,md} - P_{p,MD}$$

$$RP_{ci} = 2.r.I_{ci}^2 \int_0^{h_i} (I_{s,F(x)} - \sum_{k=1}^{i-1} I_{ck}) dx - r h_i I_{ci}^2$$

donde:

$P_{p,md}$ Pérdidas de Potencia en mínima dem.

$P_{p,MD}$ Pérdidas de Potencia en máxima dem.

I_{ci}^2 Inyección de corriente del i-ésimo capacitor conmutable

$F(x)$ Función corriente modifica por instalación de capacitores fijos

h_i Localización del i-ésimo capacitor determinado para mínima demanda.

Luego, la reducción de las pérdidas energía en

máxima demanda vendrá dada por:

$$REci = \int_{T1}^{T2} 2.r.Ici' \int_0^{hi} (Is.F(x) - \sum_{k=1}^{i-1} Ick') dx - r.hi.Ici'^2$$

En la figura 6. se muestra la curva de pérdidas horarias durante un periodo T considerando la instalación de los capacitores fijos.

En el caso de los capacitores conmutables el periodo de conexión es $TS = (t2 - t1)$ y el factor de pérdidas en ese lapso será $FP2$:

$$FP2 = \frac{\int_{t1}^{t2} r.I^2 dt / TS}{r.I_{max}^2}$$

Luego el ahorro de energía será:

$$REci = (Perd1 - Perd2) . FP2 . TS . (8760/T)$$

$$REci = FP2 . TS . (8760/T) (2r.Ici' \int_0^{hi} (Is.F(x) - \sum_{k=1}^{i-1} Ick') dx - r.hi.Ici'^2)$$

haciendo:

$$Te = FP2 . TS . 8760/T$$

$$REci = 2.r.Ici' . Te \int_0^{hi} Is.F(x) - 2.r.Ici' . hi . Te \sum_{k=1}^{i-1} Ick' - r.hi.Ici'^2 . Te$$

donde:

Ici' Corriente del i-ésimo capac.conmut.

$FP2$ Factor de pérdida de la función

PERDIDAS DE POTENCIA HORARIA

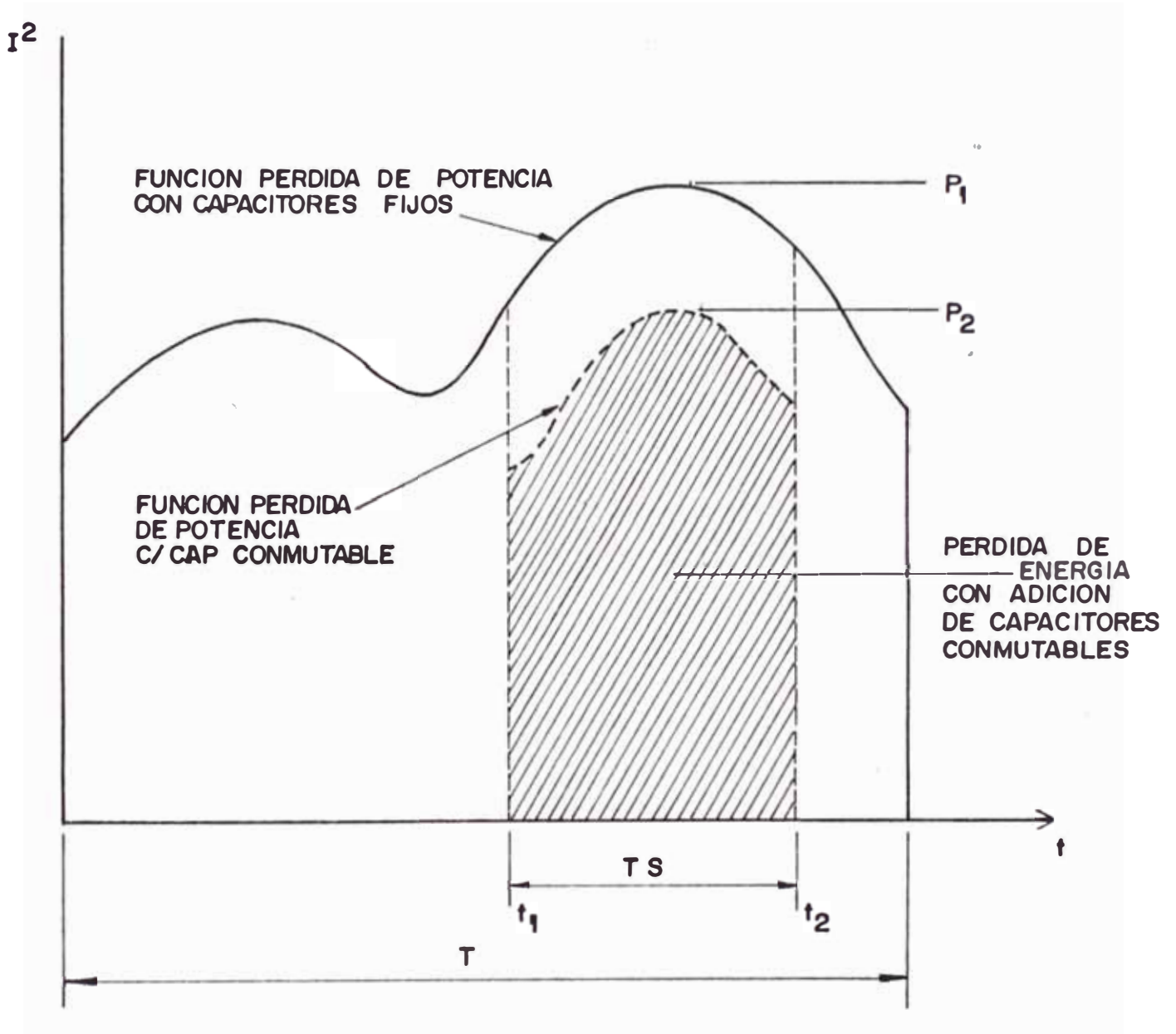


FIGURA 6

corriente reactiva en el periodo TS
TS Período de conexión de los
capacitores conmutables.

$F(x)$ Función corriente reactiva modificada

Luego, haciendo uso de la expresión definida para el ahorro (21):

$$A = K_p \cdot R P c_i + K_e \cdot R E c_i - K_c \cdot \sum_{i=1}^n I c_i'$$

Como lo que se busca es la adición de reactivos al sistema y se tiene ya definidos las localizaciones de los capacitores, solo bastará derivar la función ahorro con respecto a $I c_i'$, transformando las expresiones (32), (33) y (34) como sigue:

Para $I c_1$

$$K_p \left(2r \cdot \int_0^{h_1} I_b \cdot F(x)' dx - 2 \cdot r \cdot (h_1 I c_1' + h_2 I c_2' + h_3 I c_3') \right) \\ + K_e' \left(2 \cdot r \cdot \int_0^{h_1} I_b \cdot F(x)' dx - 2 \cdot r \cdot (h_1 \cdot I c_1' + h_2 \cdot I c_2' + h_3 \cdot I c_3') \right) - K_c = 0$$

Para $I c_2$

$$K_p \left(2r \cdot \int_0^{h_2} I_b \cdot F(x)' dx - 2 \cdot r \cdot (h_2 I c_1' + h_2 I c_2' + h_3 I c_3') \right) \\ + K_e' \left(2 \cdot r \cdot \int_0^{h_2} I_b \cdot F(x)' dx - 2 \cdot r \cdot (h_2 \cdot I c_1' + h_2 \cdot I c_2' + h_3 \cdot I c_3') \right) - K_c = 0$$

Para $I c_3$

$$K_p \left(2r \cdot \int_0^{h_3} I_b \cdot F(x)' dx - 2 \cdot r \cdot (h_3 I c_1' + h_3 I c_2' + h_3 I c_3') \right)$$

$$+ K_e' (2.r. \int_0^{h3} \frac{h3}{I_s.F(x)} dx - 2.r. (h3.Ic1+h3.Ic2+h3.Ic3)) - K_c = 0$$

donde : $K_e' = K_e.T_e = K_e.FP2.TS.8760 / T$

Simplificando las expresiones anteriores

$$h1.Ic1+h2.Ic2+h3.Ic3 = \frac{\int_0^{h1} \frac{h1}{I_s.F(x)} dx}{2.r.(K_p+K_e')} K_c$$

$$h2.Ic1+h2.Ic2+h3.Ic3 = \frac{\int_0^{h2} \frac{h2}{I_s.F(x)} dx}{2.r.(K_p+K_e')} K_c$$

$$h3.Ic1+h3.Ic2+h3.Ic3 = \frac{\int_0^{h3} \frac{h3}{I_s.F(x)} dx}{2.r.(K_p+K_e')} K_c$$

Haciendo :

$$FACII' = K_c / 2.r.(K_p+K_e')$$

Generalizando para "n" capacitores se tendrá:

$$\begin{bmatrix} h1 & h2 & \dots & hn \\ h2 & h2 & \dots & hn \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ hn & hn & \dots & hn \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ic1 \\ Ic2 \\ \dots \\ Icn \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_0^{h1} \frac{h1}{I_s.F(x)} dx - FACII' \\ \int_0^{h2} \frac{h2}{I_s.F(x)} dx - FACII' \\ \dots \\ \int_0^{hn} \frac{hn}{I_s.F(x)} dx - FACII' \end{bmatrix}$$

Conjunto de ecuaciones para determinar la corriente adicional proporcionada por el capacitor conmutable en el i-ésimo punto en hora de máxima demanda.

La corriente I_{ci} determinará el tamaño de los capacitores conmutables a instalarse en la misma ubicación de los capacitores fijos.

En el caso de que no sea necesaria la instalación de capacitores fijos (en caso de tensión adecuada en mínima demanda), se obtendrá la localización óptima de los capacitores conmutables con la siguiente expresión:

$$F(h_i) = \left(\frac{I_{ci}}{2 \cdot I_B} + \sum_{k=1}^{i-1} \frac{I_{ck}}{I_B} \right)$$

donde I_{ci} corresponde al valor inicial del i-ésimo capacitor conmutable (valor asumido)

2.6 FLUJO DE CARGA

Para sistemas simétricos en estado estable se han desarrollado una serie de métodos de estudio de flujo de carga que permiten obtener ; los flujos de Mw y MVAR en los circuitos que componen un sistema, tensiones en las barras y las pérdidas de potencia.

Entre los métodos mas difundidos se pueden mencionar:

Gauss Seidel Matriz Admitancia, Gauss Seidel Matriz Impedancia y Newton Raphson.

La formulación matemática del problema de flujo de carga conduce un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales, debido a que tienen que satisfacer las leyes de Kirchoff, esto es, la suma algebraica de los flujos de una barra deben ser iguales a cero y la suma algebraica de las tensiones de una malla deben de ser también iguales a cero.

La ecuación que describe el comportamiento de una red usando el sistema de nodos de referencia y la matriz admitancia de barras es el siguiente:

$$I \text{ nodo} = \bar{Y} \text{ nodo} \cdot V \text{ nodo}$$

En el presente trabajo se utiliza este sistema de nodos de referencia empleando la matriz admitancia, debido a la simplicidad en la preparación de los datos y la facilidad en la formación y modificación de la matriz admitancia.

El método nodal empleando la matriz impedancia requiere de un tiempo extra para obtener la matriz impedancia por inversión pero es más eficiente debido a su rápida convergencia. Sin embargo el empleo de la matriz admitancia requiere de menor almacenamiento de memoria.

2.6.1 Influencia de la Tensión en la Potencia Inyectada por el Capacitor

Las consideraciones asumidas en nuestro análisis al considerar que el alimentador tiene diferentes secciones de conductores a lo largo del mismo y al introducir la definición de función corriente (que gráfica el perfil real de la carga) son reales y son de utilidad para todos las redes primarias de la ciudad de Lima. Luego, en este acápite se hace una consideración adicional, al considerar la variación de la tensión lo largo del alimentador, para así determinar la potencia real inyectada por los capacitores instalados.

Se sabe que la potencia reactiva entregada por un capacitor depende de la tensión en sus bornes y viene dada por :

$$Q_R = V_R \times 2 \times \pi \cdot f \times C \times 10^{-9} \quad (\text{KVAR}) \quad (37)$$

donde:

Q_R = Potencia reactiva real inyectada al sistema

V_R = Tensión real en bornes del capacitor (voltios)

f = Frecuencia (Hz)

π = 3.1416

C = Capacitancia (micro faradios)

Sin embargo, la potencia nominal del capacitor

será calculada en función de su tensión nominal, por consiguiente :

$$QCN = VC^2 \times 2 \times \pi \times f \times C \times 10^{-9} \text{ (KVAR)}$$

donde :

QCN = Potencia reactiva nominal

VC = Tensión nominal

Luego, se tendrá:

$$QR = QCN \times VR^2 / VC^2 = VR \times IR \times 10^3$$

O también :

$$IR = QCN \times VR \times 10^{-3} / VC^2 \text{ AMP. (38)}$$

donde:

IR Corriente reactiva inyectada por capacitor.

Por lo tanto será necesario determinar la tensión real en cada punto de instalación de los capacitores para obtener la reducción real de las pérdidas. Para tal fin se considera dentro del proceso de optimización la utilización de un flujo de carga.

2.6.2 Influencia de la Potencia Reactiva en los Niveles de Tensión

En Sistemas de Potencia de alta tensión , la potencia reactiva tiene una influencia gravitante en la evaluación de la caída de tensión debido a la proporción de los parámetros R y X. Siendo que la diferencia de tensión

vectorial entre dos barras de la red se define por la siguiente expresión (ver figura 7) :

$$\Delta V = E - V = I Z$$

$$\Delta V = (I.R.\cos\varphi + I.X.\text{SEN}\varphi) + j (I.X.\cos\varphi - I.R.\text{SEN}\varphi)$$

o también :

$$\Delta V = \left(\frac{P + j Q}{V} \right) * (R + j X)$$

$$\Delta V = \left(\frac{R.P}{V} + \frac{X.Q}{V} \right) + j \left(\frac{X.P}{V} + \frac{R.Q}{V} \right)$$

y que es representada en la figura 8a

haciendo

$$u = \frac{R.P + X.Q}{V}$$

$$v = \frac{X.P - R.Q}{V}$$

y considerando que $v \ll u$ se tiene que la diferencia aritmética de las tensiones será de aproximadamente :

$$\Delta V \approx \frac{R.P + X.Q}{V}$$

Luego, considerando que en líneas de alta tensión $X \gg R$, se tendrá :

$$\Delta V = E - V \approx \frac{X.Q}{V}$$

y que se representa en la figura 8b

Estas consideraciones implican que al reducir la potencia reactiva, se reduce la caída de tensión . Esto se puede hacer inyectando en la red reactivos. (ref.4)

Si se inyectan suficientes reactivos se conseguirá elevar la tensión de la carga por encima de la fuente, y por consiguiente los reactivos regresarían a las fuente. De ello se afirma que la potencia reactiva fluye hacia la barra de menor tensión.

Finalmente, si existen insuficiencias de reactivos en la red, estos deberán ser proporcionados través del circuito alimentador, por lo tanto la tensión bajará.

Caso contrario, si existe exceso de reactivos en una barra, proporcionados por capacitores o cables con carga ligera, la tensión subirá.

Para nuestro caso de redes de media tensión 10 Kv. en las cuales $R = X$, la influencia de la potencia reactiva no afecta en igual medida la variación de tensión.

La caída de tensión en estas redes depende tanto de la potencia activa como de la reactiva, por lo que la mejora del nivel de tensión no es tan significativa inyectando reactivos como se puede apreciar en la figura 9, en la cual se

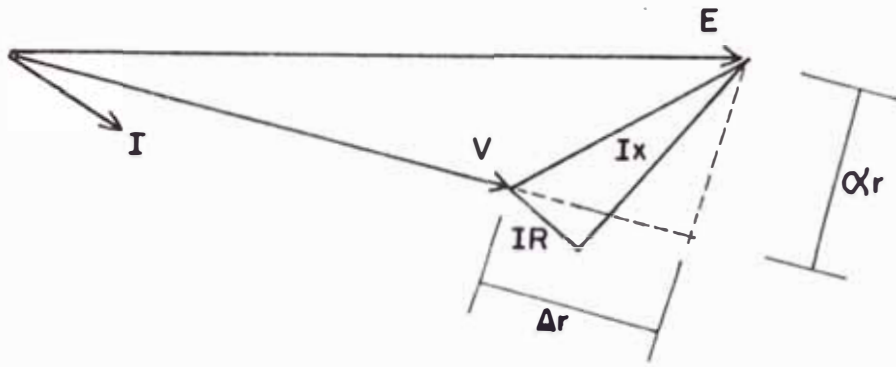
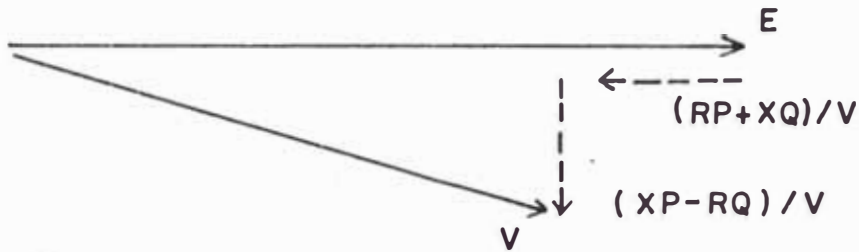


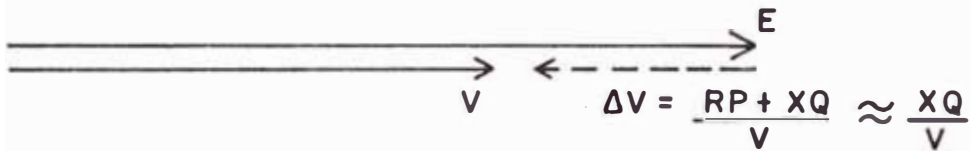
DIAGRAMA VECTORIAL V. I

FIGURA 7



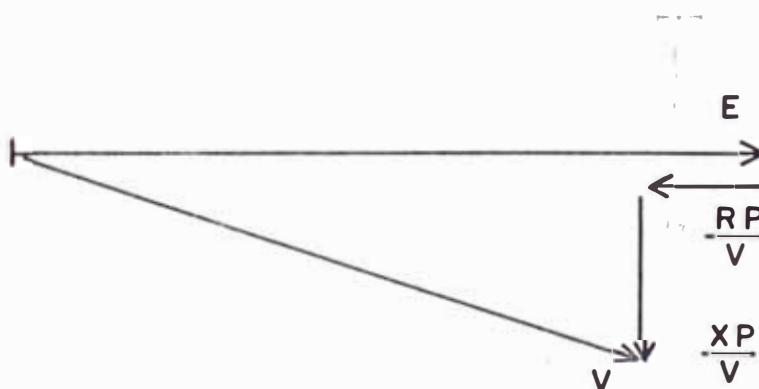
VARIACION DE LA TENSION RESPECTO a P y Q (SIST. A.T.)

FIGURA 8 a



VARIACION DE LA TENSION RESPECTO a P y Q (SIST. A.T.)

FIGURA 8 b



VARIACION DE LA TENSION RESPECTO A P y Q (SIST. MT)
EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION

FIGURA 9

representa el diagrama fasorial para $Q = 0$, donde :

$$u = R.P / V$$

$$v = X.P / V$$

0

$$V = (R.P/V) - j (X.P/V)$$

Es decir, que si se reduce los reactivos proporcionados por el alimentador a cero, la caída de tensión dependerá de la potencia activa de la carga.

De esto se deduce que fundamentalmente el análisis de optimización de instalación de capacitores en redes de distribución primaria debe de ser enfocado desde el punto de vista de pérdidas.

2.6.3. FLUJO DE CARGA

En las redes de distribución primaria analizadas se observa que las variables de potencia activa y reactiva entregada por la Sub-Estación de Transmisión no son variables controladas dado que no pueden ser manipuladas y dependen de las variables de disturbio o no controladas, que como se sabe, dependen a su vez de la demanda de los usuarios.

Lo que se trata es de determinar las variables de estado V_i y δ_i para cada barra, teniéndose la barra V_1 y δ_1 (barra de la SET) con valores especificados, en donde V_1 depende de el ajuste del regulador de tensión del transformador de potencia 60/10 Kv. en la Sub-Estación de Transmisión.

Para nuestros cálculos se suponen conocidos las potencias activas y reactivas de carga o demanda en cada una de las $(n-1)$ barras de las sub-estaciones de distribución.

El método iterativo de Gauss-Seidel para la resolución de ecuaciones no lineales complejas es relativamente simple de ser aplicado.

La formulación matemática para un sistema de n barras, en donde las variables complejas de las tensiones por barra y la potencia inyectada están relacionadas a través de la *matriz admitancia de $[Y]$ y cuyo desarrollo es el siguiente :

teniéndose la ecuación matricial básica :

$$[I] = [Y] [V] \quad (39)$$

$$[I] = [V] / [Z]$$

La corriente nodal I_i que se inyecta a la red en el nodo i , es la suma de las corrientes que

salen de dicho nodo :

$$I_i = I_{i1} + I_{i2} + \dots + I_{ij} + \dots + I_{in}$$

En la figura 10 se representa el nodo i y todos sus ramales.

Luego,

$$I_{i1} = (V_i - V_1) / Z_{i1}$$

$$I_{i2} = (V_i - V_2) / Z_{i2}$$

.....

Reemplazando:

$$I_i = \frac{V_i - V_1}{Z_{i1}} + \frac{V_i - V_2}{Z_{i2}} + \frac{V_i - V_j}{Z_{ij}} + \frac{V_i - V_n}{Z_{in}}$$

$$+ \left(\frac{V_1}{Z_{i1}} - \frac{V_2}{Z_{i2}} - \dots - \frac{V_j}{Z_{ij}} - \dots - \frac{V_n}{Z_{in}} + \left(\frac{1}{Z_{i1}} + \frac{1}{Z_{i2}} + \dots \right) V_i \right)$$

utilizando el parámetro admitancia:

$$I_i = -y_{i1}.V_1 - \dots - y_{ij}.V_j - \dots - y_{in}.V_n + (y_{i1} + \dots + y_{in}) V_i$$

$$I_i = -y_{i1}.V_1 - y_{i1}.V_2 - \dots + y_{ji}.V_i + \dots - y_{in}.V_n$$

Luego, transformando a terminos de matriz admitancia:

$$I_i = Y_{i1}.V_1 + Y_{i2}.V_2 + \dots + Y_{ii}.V_i + \dots + Y_{in}.V_n \quad (40)$$

donde

$$Y_{ij} = -y_{ij} \quad i \neq j$$

$$Y_{ij} = y_{ji} \quad i \neq j$$

$$Y_{ii} = \sum_{j=1}^n y_{ij}$$

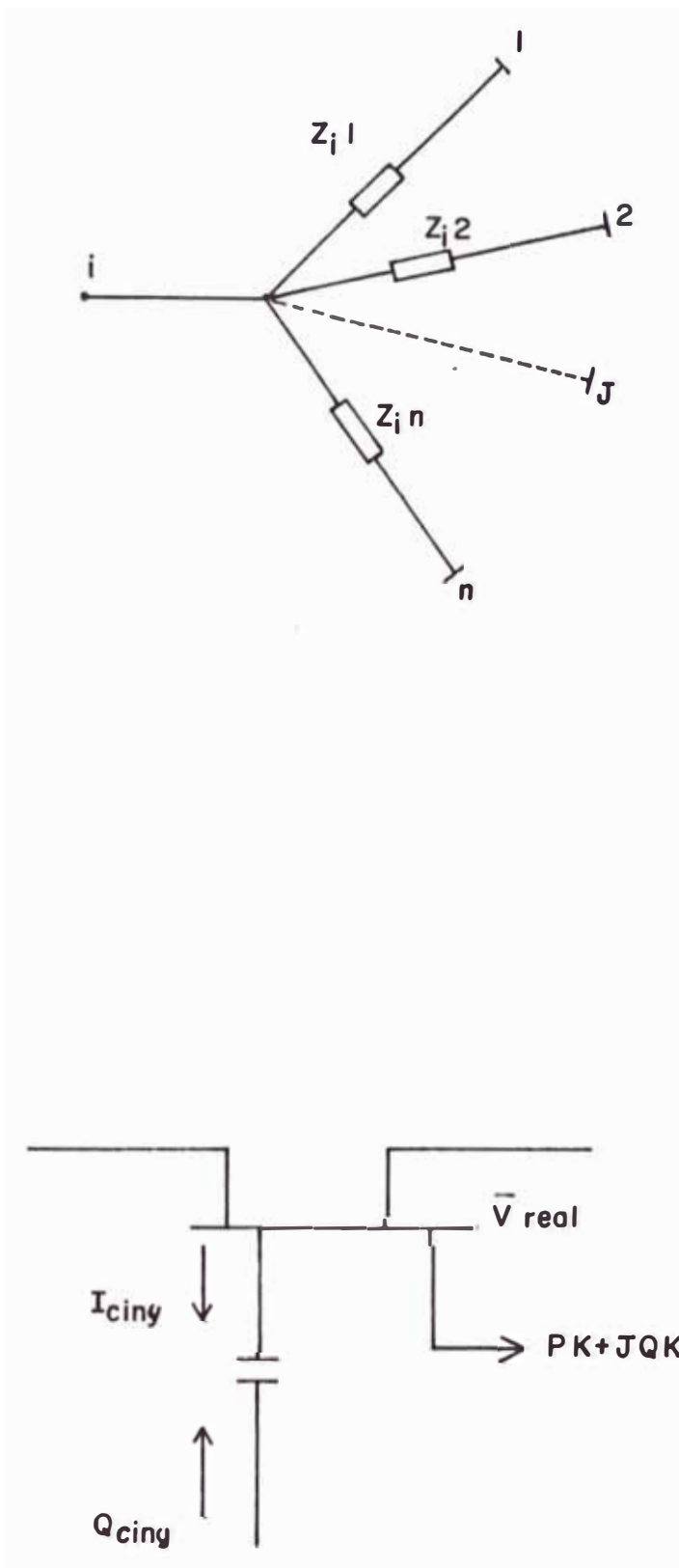


FIGURA 10

La matriz $[Y]$ constituye un modelo de la parte pasiva de la red y se tiene las siguientes reglas:

1) Los elementos de la diagonal Y_{ii} se obtienen como una suma algebraica del total de admitancias que inciden en la barra i

2) Los elementos fuera de la diagonal son obtenidos como el negativo de la admitancia conectada al nodo i y j

En forma matricial

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_i \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2i} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{ni} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_i \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix}$$

Asimismo, se tiene que la potencia inyectada al sistema estará dada por :

$$S_i = V_i \cdot I_i^*$$

luego

$$I_i = \frac{S_i^*}{V_i} = \frac{P_i - Q_i}{V_i}$$

Conviene indicar que la potencia S_i de carga en la i -ésima barra tendrá signo negativo.

Reemplazando en la expresión (40)

$$\frac{P_i - \sum_{j=1}^n Q_j}{Y_{ii}} = Y_{ii} \cdot V_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} \cdot V_j$$

despejando:

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - \sum_{j=1}^n Q_j}{V_i} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} \cdot V_j \right] \quad (41)$$

haciendo:

$$FIV_i = (P_i - \sum_{j=1}^n Q_j) / Y_{ii}$$

$$MA_{ij} = Y_{ij} / Y_{ii}$$

Se podrá expresar la ecuación (41) como sigue

$$V_i = \frac{FIV_i}{Y_{ii}} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n MA_{ij} \cdot V_j \quad (42)$$

El proceso iterativo se inicia con valores asumidos para cada barra del sistema y en la siguiente iteración se utiliza el valor calculado para dicha barra en la iteración anterior:

$$V_i^{k+1} = \frac{FIV_i^k}{Y_{ii}^k} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n MA_{ij} \cdot V_j^k$$

Asimismo, se puede acelerar el proceso de convergencia considerando el último valor de la tensión calculada para la barra precedente (si a hubiera) :

$$V_i^{k+1} = \frac{FIV_i^k}{Y_{ii}^k} - \sum_{j=1}^{i-1} MA_{ij} \cdot V_j^{k+1} - \sum_{j=i+1}^n MA_{ij} \cdot V_j^k$$

La rapidez de la convergencia brindará menor tiempo de máquina en el proceso iterativo, por lo que se recomienda una extrapolación lineal de cada variable en cada iteración. Esto se realiza mediante un factor (alfa) el cual varía entre 1 y 2.

Teniendo el valor de las dos últimas iteraciones k y $k+1$ de la i -ésima barra, se determina su nuevo valor, que será de utilidad en la siguiente iteración, como sigue:

$$V_i^{k+1} = V_i^{k+1} - V_i^k$$

el nuevo valor será:

$$V_i^{k+1} = V_i^k + (\text{alfa}) \times V_i^{k+1}$$

acelerado

En el análisis de flujo de carga se emplea únicamente la red de secuencia positiva debido a que el acoplamiento entre las redes de secuencia positiva y negativa o entre la secuencia positiva y cero, es generalmente muy pequeño y además se supone la carga balanceada. Asimismo, como el acoplamiento mutuo entre las redes de secuencia es despreciable, el efecto mutuo es despreciable en el estudio de flujo de carga.

Conviene recalcar que en nuestras redes las barras se consideran, como se ha mencionado .

La rapidez de la convergencia brindará menor tiempo de máquina en el proceso iterativo, por lo que se recomienda una extrapolación lineal de cada variable en cada iteración. Esto se realiza mediante un factor (alfa) el cual varía entre 1 y 2.

Teniendo el valor de las dos últimas iteraciones k y $k+1$ de la i -ésima barra, se determina su nuevo valor, que será de utilidad en la siguiente iteración, como sigue:

$$V_i^{k+1} = V_i^{k+1} - V_i^k$$

el nuevo valor será:

$$V_i^{k+1} \text{ acelerado} = V_i^k + (\text{alfa}) \times V_i^{k+1}$$

En el análisis de flujo de carga se emplea únicamente la red de secuencia positiva debido a que el acoplamiento entre las redes de secuencia positiva y negativa o entre la secuencia positiva y cero, es generalmente muy pequeño y además se supone la carga balanceada. Asimismo como el acoplamiento mutuo entre las redes de secuencia es despreciable, el efecto mutuo es despreciable en el estudio de flujo de carga.

Conviene recalcar que en nuestras redes las barras se consideran, como se ha mencionado .

del tipo P-Q en donde los valores determinarse son V_i y ϕ_i . Sin embargo, se observa que aun cuando se desea utilizar capacitores que inyectarán una potencia reactiva Q_i determinada para obtener una tensión V_i en la i -ésima barra, ésta no puede ser considerada del tipo P-V, puesto que se desconoce el punto de instalación de los capacitores, el cual se calculará para una optimización en la reducción de pérdidas y se efectuará luego de haber definido el perfil de tensiones gracias al análisis de flujo de carga.

Determinadas las tensiones en las barras de un alimentador, se determinarán las potencias y corrientes que fluyen por los enlaces mediante las siguientes expresiones:

$$S_{ij} = V_i \cdot (V_i - V_j) \cdot Y_{ij} + V_i \cdot V_j \cdot Y_{sh}$$

$$S_{ji} = V_i \cdot (V_j - V_i) \cdot Y_{ji} + V_j \cdot V_i \cdot Y_{sh}$$

$$I_{ij} = (V_i - V_j) \cdot Y_{ij} + V_i \cdot Y_{sh}$$

El balance de potencia entre dos barras conectadas es:

Potencia Activa Generala	Potencia Activa de Carga	+	Pérdidas Activas de la línea
Potencia Reactiva Generada	Potencia Reactiva de Carga	+	Pérdidas Reactivas de línea - Aporte de Reactivos de línea

CAPITULO 3 PROGRAMA COMPUTACIONAL

Se ha desarrollado el programa denominado CAP89, el cual está compuesto por un programa principal de cálculo de Flujo de Carga y una sub-rutina denominada OPTI que proporciona la lógica de optimización. Asimismo, se incluye una sub-rutina de OPTI que se denomina INVERSA, que permite la inversión de matrices escalares.

El programa ha sido escrito en Fortran IV, consta en su conjunto de 727 sentencias y requiere de los datos de las líneas y cables instalados en las redes analizadas. Además, requiere de las cargas en las sub-estaciones de distribución, el diagrama de carga del alimentador y las constantes de pérdidas de potencia, energía y los costos de los KVA instalados.

En los Apendices A y B se muestran los diagramas de flujo simplificados de los programas CAP89 y OPTI.

El programa básico requiere de una memoria de 28,340 bytes y ha sido desarrollado y probado en una computadora IBM- 4381. Tiempo de compilación 6.09 segundos. Tiempo de procesamiento para un caso de cálculo de 1.04 segundos.

3.1 Datos d. Entr,da

3.1.1. Parámetros y Datos de Redes y Subestaciones

En el cuadro 1 se muestran los parámetros característicos para cada sección de cable o línea aérea existente en las redes de distribución primaria de , Electrolima.

En las redes de distribución primaria 10 Kv, la admitancia shunt (Y_{sh}) es reducida (resultado de la l. conductancia shunt y suceptancia shunt $Y_{sh} = 1/(G+jBc)$).

De estos parámetros, la conductancia es muy difícil de determinar, puesto que refleja las pérdidas de corriente a través de los elementos que conectan el conductor con tierra y que son fundamentalmente a través de los aisladores (depende de condiciones climáticas).

La capacitancia de las líneas y cables es de valor muy reducido.

Asimismo , otro dato con el que se cuenta es el de corriente a la salida del alimentador en las Subestaciones de Transmisión, la misma que se hace por el sistema de telecontrol via microrondas.

CUADRO Nro.1

SECCION mm ²	RESISTENCIA Ohm/km	REACTANCIA Ohm/km	SUCEPTANCIA Mhos/km x 10 ⁻⁶
16Cu	1.3800	0.1440	0.57600
35Cu	0.6280	0.1170	0.71250
70Cu	0.3250	0.1090	0.87085
120Cu	0.1830	0.1020	0.10103
240Cu	0.0890	0.0960	0.12139
13Cu	1.5851	0.4810	0.03321
21Cu	0.9969	0.4640	0.03450
33Cu	0.6270	0.4460	0.03586
33AL	1.1966	0.4450	0.03586
67Cu	0.3126	0.4160	0.03815
67AL	0.5894	0.4200	0.03815
125A1	0.3159	0.4450	0.04045
95Cu	0.2219	0.1030	0.04045

3.1.2 Determinación de los Parámetros K_P , K_E y K_C

La función ahorro definida en el capítulo 2 y expresada por la fórmula (21) representa el ahorro total (beneficio neto) en unidades monetarias de la utilización de capacitores.

Esta expresión la componen el beneficio obtenido en la reducción de pérdidas y energía por el uso de capacitores y los costos que implica su adquisición e instalación:

$$A = k_p.RP_c + k_e.RE_c - k_c. \sum_{i=1} I_{ci}$$

Para la determinación de la constante K_c costo de cada KVAR instalado y que comprende básicamente el costo de inversión, supuesto que el costo de operación y mantenimiento se considere mínimo para este tipo de equipos. Se considera en el estudio

$K_c = 10$ \$/kVar para capacitores fijos y $K_c = 13$ \$/kVar para capacitores conmutables.

La determinación de las constantes K_p (costo de cada kW de pérdida de potencia reducida) y K_e (costo de cada kWhr de pérdida de energía reducida) es un poco más complejo. Estos se estiman sobre la base de los costos marginales de P producido durante la hora punta.

En un estudio del Ministerio de Energía y Minas hecho por SOFRELEC.EDF en 1982 se realiza la elaboración de los costos marginales para el Sistema Centro-Norte. Posteriormente son actualizados en un estudio sobre administración de carga y conservación de energía realizado para Electrolima en 1986. Para ello se consideran las costos de inversión de centrales eléctricas marginales y costos de combustibles, costos de desarrollo de redes a los diferentes niveles de tensión hasta Media Tensión.

Los resultados son como sigue:

$K_p = 117.9$ \$/kW

$K_e = 6.85$ Cent.\$/kW-hr

3.2 Programa Principal

El programa principal consta de sentencias en el que

se desarrolla la programación del flujo de carga por el método de Gauss Seidel Matriz Admitancia. En este se leen todos los parámetros característicos para todas las secciones.

El programa considera la variación de la sección en un mismo tramo del alimentador, condición que caracteriza las redes de distribución primaria, la lectura de estos parámetros son almacenados en variables unidimensionales y luego ordenados para formar la matriz admitancia y almacenada en variables bidireccionales.

Se calcula también el alimentador equivalente por unidad y se almacenan en variables unidimensionales que luego serán transferidos a la sub-rutina "OPTI".

Se efectúa el flujo de carga para obtener tensiones y flujos de corriente a lo largo del alimentador.

La componente reactiva de la corriente es almacenada en una variable unidimensional y luego se determina la función distribución de corriente reactiva que es transferida a la sub-rutina "OPTI". Luego de que son determinadas las capacidades y localizaciones óptimas de los capacitores gracias a la sub-rutina "OPTI", se vuelve a calcular el flujo de carga con la introducción de este nuevo componente en la red. El resultado será un perfil mejorado de las tensiones y una reducción

máxima de las pérdidas de potencia y energía.

El programa está preparado para un sistema de 49 líneas, 50 barras y variaciones de secciones, y requiere de 172 Kbytes de memoria.

3.3 Sub-Rutina de Optimización

Este sub-programa recibe del programa principal las variables de distancia equivalente por unidad y forma la matriz distancia equivalente por unidad del alimentador. Asimismo, recibe la función distribución de corriente reactiva.

Se inicializa suponiendo unos valores determinados de corriente de capacitores y en base a la expresión (29) se determina los $F(h_i)$:

$$F(h_i) = \frac{k_p + k_e.T}{k_p + k_e.T.F.C.} \left(\frac{I_{ci}}{2.I_S} + \sum_{k=1}^{i-1} \frac{I_{ck}}{I_S} \right)$$

Estas funciones se ajustan al valor inmediato superior de la curva de distribución de corriente reactiva que es una función escalon, determinándose las localizaciones óptimas de los capacitores en i -ésima iteración.

Seguidamente, con los valores de localización obtenidos se determinan los nuevos valores de corriente de los capacitores través de la expresión (35).

$$\begin{bmatrix} h1 & h2 & \dots & hn \\ h2 & h2 & \dots & hn \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ hn & hn & \dots & hn \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c1} \\ I_{c2} \\ \dots \\ I_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{ACI} \int_0^{h1} IS.F(x).dx & -F_{ACII} \\ F_{ACI} \int_0^{h2} IS.F(x).dx & -F_{ACII} \\ \dots & \dots \\ F_{ACI} \int_0^{hn} IS.F(x).dx & -F_{ACII} \end{bmatrix}$$

Se transfiere la matriz localización a la sub-rutina "inversa" para obtener la inversa de la matriz de localizaciones óptimas y se calculan los nuevos valores de I_{ci}.

Se repite el proceso hasta que las localizaciones h_i y las capacidades I_{ci} convergen.

En resumen, los valores iniciales de I_{ci} utilizando la optimización de la función Ahorro "A" dan como resultado los valores de h_i optimizados. Luego, los valores optimizados de h_i utilizando la optimización de la función Ahorro "A" dan como resultado los valores de I_{ci} optimizados.

3.4 Manual del Usuario

Descripción y formato de los datos de entrada.

1ER. GRUPO DE TARJETAS

VARIABLE	DESCRIPCION	FORMATO	COLUMNA
NB	Número barras	I 3	1-
NL	Número líneas	I 3	4-
MVAB	Potencia Base (MVA)	F5.1	7-11
VREFE	Tensión de referencia real	F4.1	12-15
KVB	Tensión Base (Kv)	F4.1	16-19

VMIN	Tensión mínima (Kv)	F4.1	20-23
VKO	Tensión en barras de la Subest. Transmisión (Kv)	F4.1	24-27
ALPHA	Factor de aceleración	F4.2	28-31

2DO GRUPO DE TARJETAS

Este grupo de tarjetas se repiten como tramos presente el alimentador

VARIABLE	DESCRIPCION	FORMATO	COLUMNA
LIN(I)	Número de Línea	I2	1- 2
NSEC(I)	Número de secciones	I2	3- 4
BE(I)	Barra de envío	I2	5- 6
BR(I)	Barra de recepción	I2	7- 8
SC(I,1)	Sección	A4	9-12
LG(I,1)	Longitud de tramo	F6.1	13-19
SC(I,2)	Sección	A4	20-23
LG(I,2)	Longitud de tramo	F6.1	24-29
SC(I,3)	Sección	A4	30-33
LG(I,3)	Longitud de tramo	F6.1	34-39
SC(I,4)	Sección	A4	40-43
LG(I,4)	Longitud de tramo	F6.1	44-49
SC(I,5)	Sección	A4	50-53
LG(I,5)	Longitud de tramo	F6.1	54-59

3ER GRUPO DE TARJETAS

Este grupo de tarjetas se repite tantas veces como subestaciones tenga el alimentador

VARIABLE	DESCRIPCION	FORMATO	COLUMNA
IT(J)	Corriente de carga en mín.demanda (Amp)	F6.1	1- 6
FI(J)	Angulo de corriente en mín.demanda(grados)	F5.1	9-13
V(J)	Tensión inicial en barra j (Kv)	F5.2	16-20
IM(J)	Corriente de carga en máx.demanda (Amp)	F6.1	23-27
FIC(J)	Angulo de corriente en máx.demanda(grados)	F5.1	30-34

4TO GRUPO DE TARJETAS

VARIABLE	DESCRIPCION	FORMATO	COLUMNA
NCA	Número de capacitores	I3	1- 3

NC si es cero se calcula el número óptimo de cap. Variable para dar tamaño de capacitores iniciales introduciendo el número 1. Con cero no considera esta opción. I3 4- 6

5TO GRUPO DE TARJETAS

VARIABLE	DESCRIPCION	FORMATO	COLUMNA
ICA(1,1)	Tamaño inicial de capacitore 1. Se utiliza solo si NC es diferente de cero	F5.1	1- 5
ICA(2,1)	IDEM para capacitor número 2	F5.1	7-11
ICA(3,1)	IDEM para capacitor número 3	F5.1	13-17
ICA(4,1)	IDEM para capacitor número 4	F5.1	19-23
ICA(5,1)	IDEM para capacitor número 5	F5.1	25-29
ICA(6,1)	IDEM para capacitor número 6	F5.1	31-35

6TO GRUPO DE TARJETAS

VARIABLE	DESCRIPCION	FORMATO	COLUMNA
Kp	Constante de Pérdidas de potencia (\$/ Kw)	F6.1	1- 6
Ke	Cons ante de Pérdidas de energía (\$/Kw-hr/año)	F6.1	9-14
Kc	Constante de costo de capacitores (\$/ KVAR)	F6.1	17-22
TS	Tiempo de operación de capacitores shunt. (horas)	F4.0	25-28
TASA	Tasa de interés de capital	F4.2	31-34
ANO	Periodo de estudio económico	F3.0	37-39

7MO GRUPO DE TARJETAS

Carga horaria del alimentador

VARIABLE	DESCRIPCION	FORMATO	COLUMNA
DC(J)	Hora 1:00	F4.0	1- 4
	Hora 2:00	F4.0	5- 8

Hora	3:00	F4.0	9-12
Hora	4:00	F4.0	13-16
Hora	5:00	F4.0	17-20
Hora	6:00	F4.0	21-24
Hora	7:00	F4.0	25-28
Hora	8:00	F4.0	29-32
Hora	9:00	F4.0	33-36
Hora	10:00	F4.0	37-40
Hora	11:00	F4.0	41-44
Hora	12:00	F4.0	45-48

BVO GRUPO DE TARJETAS

Carga horaria del alimentador

VARIABLE	DESCRIPCION	FORMATO	COLUMNA
DC(J)	Hora 13:00	F4.0	1- 4
	Hora 14:00	F4.0	5- 8
	Hora 15:00	F4.0	9-12
	Hora 16:00	F4.0	13-16
	Hora 17:00	F4.0	17-20
	Hora 18:00	F4.0	21-24
	Hora 19:00	F4.0	25-28
	Hora 20:00	F4.0	29-32
	Hora 21:00	F4.0	33-36
	Hora 22:00	F4.0	37-40
	Hora 23:00	F4.0	41-44
	Hora 24:00	F4.0	45-48

CAPITULO 4 APLICACIONES

Como se ha mencionado en el captitulo 1, la problemática xistente en redes de distribución primaria consiste en la presencia de alimentadores 10 Kv. con extensos radios de influencia y/o regimen de carga que provocan tensiones deficientes y pérdidas de potencia y energía que pueden ser reducidas.

En el presente capitulo se exponen dos casos de alimentadores con los problemas mencionados, determinándose la localización y dimensión óptima para capacitores.

4.1 Caso del Alimentador A-1 de la Sub-Estacion de Transmision Puente

Este alime ador atiende una vasta zona industrial con una longitud de 8,552 mts. solo en su circuito troncal como se puede apreciar en la figura 11. Con una carga de 107.3 Amp. y 214.6 Amp. (factor de potencia de 0.87) en mínima y máxima demanda respectivamente

En los cuadros 2 y 3 se muestran las bases de cálculo y los parámetros del alimentador.

Se muestra adicionalmente la resistencia, reactancia y susceptancia real por circuito. Parámetros que serán utilizados para el cálculo del flujo. La longitud equivalente del alimentador, esto es la longitud considerando una resistencia uniforme de 0.183 Ohm/Km, es de 17,148 mts.

Evaluación en Mínima Demanda- Capacitores Fijos

En los cuadros de resultados de flujo de carga en redes (cuadro 4.) se observa que la tensión llega hasta 9,530 voltios bajo las condiciones de carga de mínima demanda. La tensión en la salida de la Sub-Estación de Transmisión se considera de 10,000 Voltios en mínima demanda, valor ajustado en el regulador de tensión del transformador 60/10 Kv..

Asimismo, se observa el flujo de potencia y corriente través de todos los circuitos del alimentador y finalmente se muestra la función corriente reactiva por unidad, la misma que se grafica en la figura 13. En la figura 12 se muestra el alimentador equivalente por unidad.

Las pérdidas de potencia para estas condiciones ascienden 53.26 Kw de las cuales 14.70 Kw se deben la componente reactiva de la corriente.

Para este caso la mejor alternativa es la instalación de 3 capacitores a lo largo del alimentador, considerando

como valores iniciales para el proceso de optimización 0.333 P.U. , que equivale a la tercera parte del total de reactivos entregados desde la salida del alimentador.

En la figura 14 se muestra el perfil de tensiones lo largo del alimentador en mínima demanda para las condiciones normales y para la operación con capacitores fijos.

Los resultados del proceso de optimización arroja los siguientes resultados:

	Dist.Equivalente	Corriente Cap. P.U.
1er Capacitor	1.00	0.250
2do Capacitor	0.94	0.306
3er Capacitor	0.45	0.342

Estos resultados corresponden a los capacitores en mínima demanda , es decir los capacitores fijos (ver Cuadro 5) . La función corriente reactiva por unidad modificada se muestra en el cuadro 6 y se grafica en la figura 13, indicándose la localización óptima de los capacitores.

El perfil de tensiones queda mejorado (Cuadro 7.) ,obteniéndose una tensión mínima de 9,666 Voltios.

Según el Código Nacional de Electricidad en su tomo IV en su capítulo 2, acápite 2.1.3, indica que la caída de tensión permisible en Redes de Distribución Primaria será

de 3.5 % (350 Voltios) en alimentadores urbanos y de 5.0% en alimentadores rurales. Por lo tanto la tensión mínima es de 9,650 Voltios. Sin embargo, cabe indicar que los transformadores de distribución 10/.23 Kv. utilizados en las redes de Lima, poseen Tap fijos que permiten obtener una relación de transformación de 9.5/.23 Kv. Por tal motivo, podemos considerar como tensión mínima admisible 9,500 Voltios en las redes de distribución primaria.

Las pérdidas de potencia debido a la componente reactiva de la corriente se reducen a 0.05 Kw, tal como se puede apreciar en el cuadro de Función de Corriente Reactiva Modificada (Cuadro 6).

Considerando los niveles de tensión reales de los puntos de instalación de los capacitores fijos se determina su capacidad nominal, como se muestra en el cuadro 8 . Asimismo, se muestra el resultado de la función Ahorro, esto es el ahorro total o neto en dolares USA, el que asciende 271.70 en el séptimo año de operación. Es decir, la recuperación de la inversión se realiza al año 7.

Evaluación en Máxima Demanda-Capacitores Conmutables

En el cuadro 9 se muestran los resultados del flujo de carga del alimentador A-1 en condiciones de carga de máxima demanda, obteniéndose hasta 9,262 voltios de tensión en el punto mas alejado del circuito troncal. Esto sin considerar la instalación de capacitores fijos

determinados anteriormente. Con un total de 212.83 Kw de pérdidas de potencia.

En el cuadro 10 se considera la instalación de los 3 capacitores fijos, con lo cual se mejora la tensión en el último punto a 9,406 voltios (ver figura 17)

Bajo esta consideración se procede a efectuar el cálculo d optimización de capacitores partiendo de la localización precalculada de los capacitores fijos, obt niéndose los siguientes resultados:

	Dist.Equivalente	Corriente Cap. P.U.
1er Capacitor	1.00	0.234
2do Capacitor	0.94	0.290
3er Capacitor	0.45	0.342

En el cuadro 12 se muestra la nueva función corriente reactiva, la misma que se grafica en la figura 16.

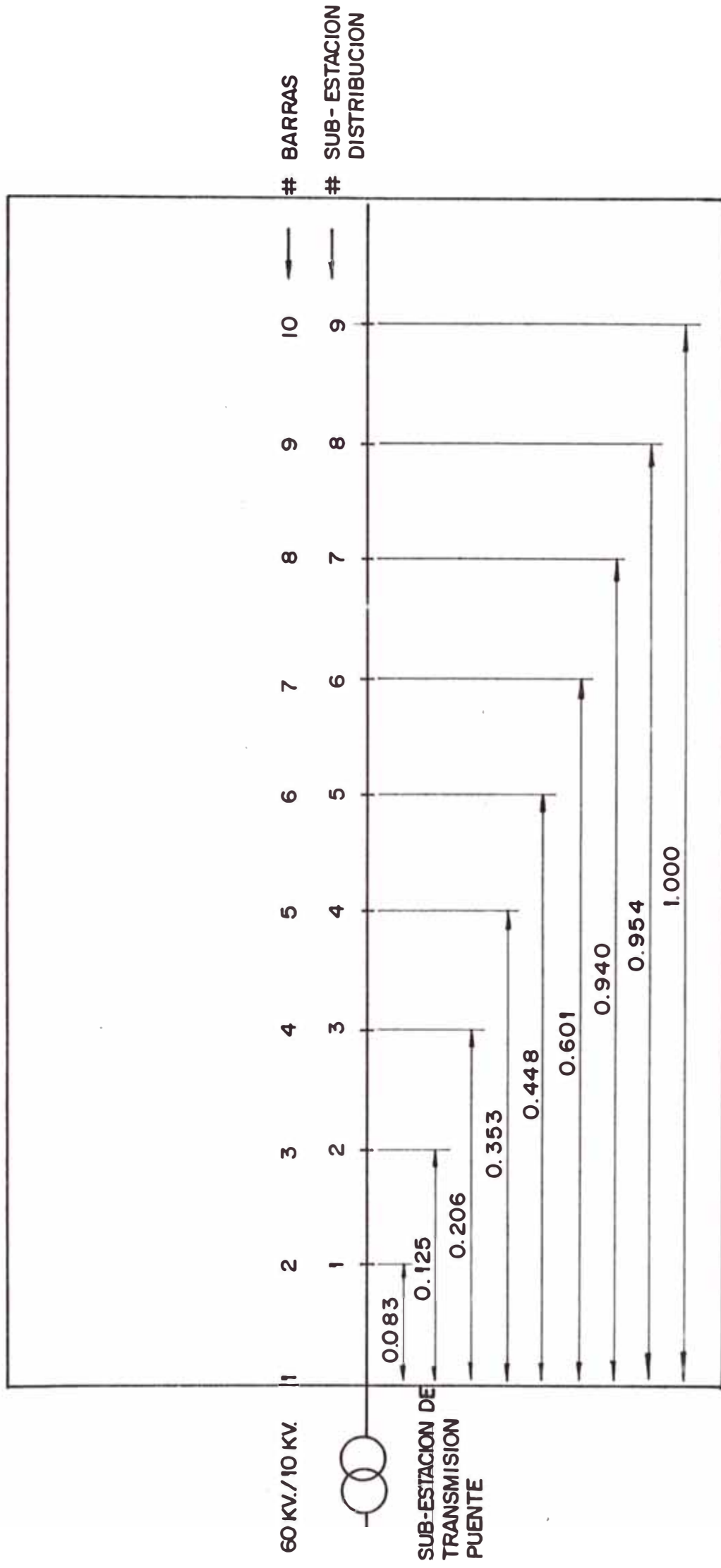
Los resultados del flujo de carga para esta condición se muestra en el cuadro 13. obteniéndose una tensión mínima de 9,549 Voltios.

En la figura 17 se muestra el perfil de tensiones en máxima demanda a lo largo del alimentador.

Finalmente, en el cuadro 14 se observa el tamaño de los capacitores conmutables y los resultados de reducción de pérdidas de potencia y energía y el ahorro total de

601.71 dolares USA.

Finalmente, se concluye que el beneficio económico por la instalación de capacitores es de \$ 873.41 al septimo año de operación (periodo de recuperación de capital 7 años).



ALIMENTADOR EQUIVALENTE UNITARIO DE ALIMENTADOR A-1-SET.PUENTE

FIGURA 12

FUNCION CORRIENTE REACTIVA - MINIMA DEMANDA

ALIMENTADOR A-1 - SET. PUENTE

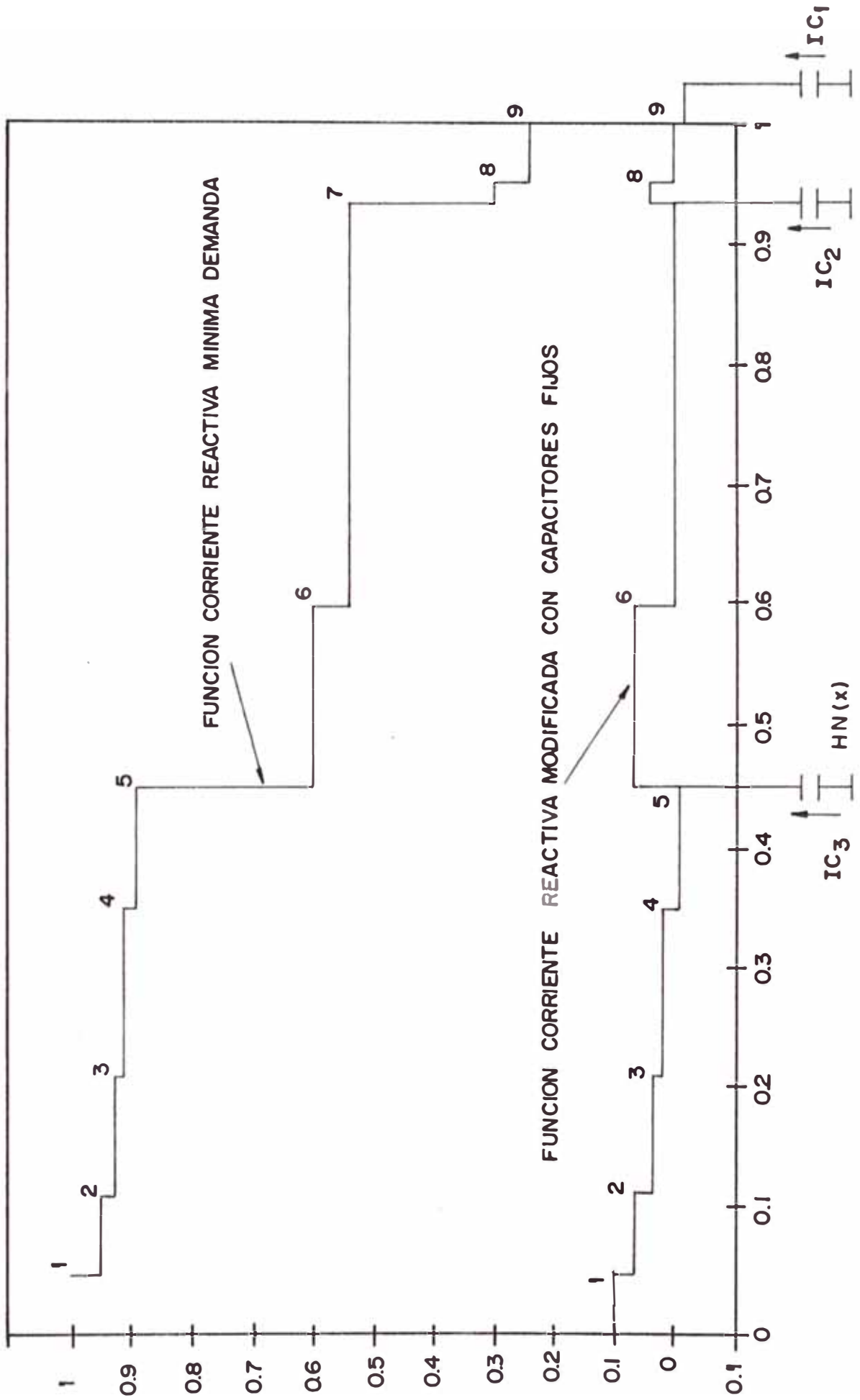


FIGURA 13

FUNCION CORRIENTE REACTIVA MAX. DEMANDA

ALIMENTADOR A-1 - SET. PUNTE

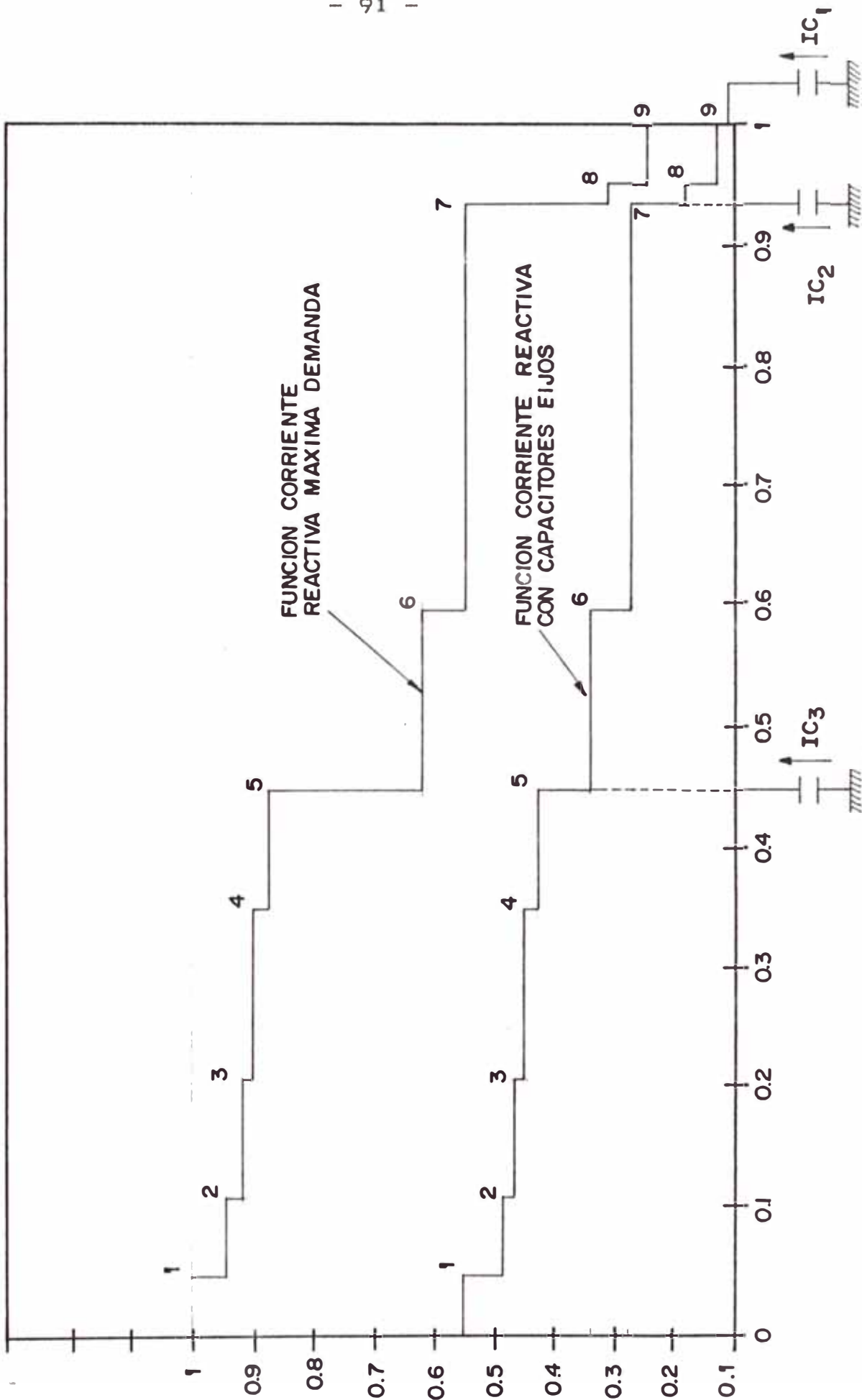


FIGURA 15

FUNCION CORRIENTE REACTIVA MAX. DEMANDA

ALIMENTADOR A-1 - SET. PUENTE

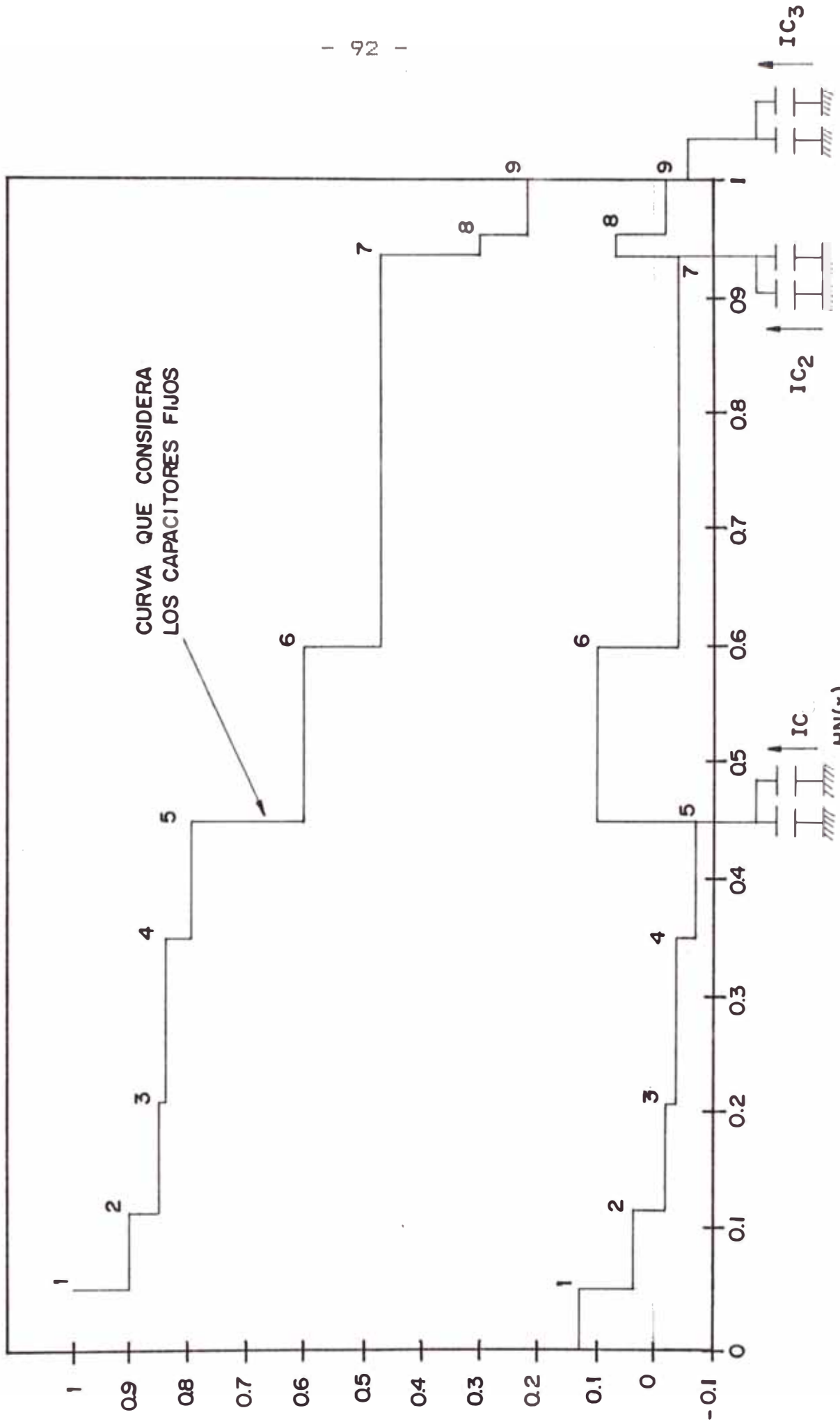


FIGURA 16

4.2 Caso del Alimentador B-6 de la Sub-Estación de Transmisión Barranco

Este alimentador posee una longitud de 7999 mts. solo en su circuito troncal, tal como se puede apreciar en la figura nro.18. Con una carga de 92.2 Amp. y 241.7 Amp. (factor de potencia de 0.88 y 0.89 respectivamente) en mínima y máxima demanda respectivamente .

En los cuadros 15 y 16 se muestra las bases de cálculo y los parámetros del alimentador. Asimismo, se muestra la resistencia, reactancia y susceptancia por circuito. La longitud equivalente del alimentador, esto es la longitud considerando una resistencia uniforme de 0.183 Ohm/Km, es de 12,822 mts.

Evaluación en Mínima Demanda- Capacitores Fijos

En los cuadros de resultados de flujo de carga en redes (cuadro 17) se observa que la tensión llega hasta 9,696 voltios bajo las condiciones de carga de mínima demanda. La tensión en la salida de la Sub-Estación de Transmisión se considera de 10,000 Voltios en mínima demanda, valor ajustado en el regulador de tensión del transformador 60/10 Kv..

Asimismo, se observa el flujo de potencia y corriente través de todos los circuitos del alimentador y finalmente se muestra la función corriente reactiva por unidad, la misma que se grafica en la figura 20. En la figura 19 se muestra el alimentador equivalente por

unidad.

Las pérdidas de potencia para estas condiciones ascienden 35.85 Kw de las cuales 8.10 Kw se deben a la componente reactiva de la corriente.

Para este caso la mejor alternativa es la instalación de 2 capacitores a lo largo del alimentador, considerando como valores iniciales para el proceso de optimización 0.500 P.U. , que equivale a la tercera parte del total de reactivos entregados desde la salida del alimentador.

En la figura 21 se muestra el perfil de tensiones a lo largo del alimentador en mínima demanda para las condiciones normales y para la operación con capacitores fijos.

Los resultados del proceso de optimización arroja lo siguiente :

	Dist.Equivalente	Corriente Cap. P.U.
1er Capacitor	0.90	0.440
2do Capacitor	0.52	0.460

Estos resultados corresponden a los capacitores en mínima demanda , es decir los capacitores fijos (ver Cuadro 18) . La función corriente reactiva por unidad modificada

se muestra en el cuadro 19 y se grafica en la figura 20, indicándose la localización óptima de los capacitores.

El perfil de tensiones queda mejorado (Cuadro 20) ,obteniéndose una tensión mínima de 9,765 Voltios.

Las pérdidas de potencia debido a la componente reactiva de la corriente se reducen a 0.18 Kw, tal como se puede apreciar en el cuadro de Función de Corriente Reactiva Modificada (Cuadro 19).

Considerando los niveles de tensión reales de los puntos d instalación de los capacitores fijos se determina su capacidad nominal, como se muestra en el cuadro 21 . Asimismo, se muestra el resultado de la función Ahorro, esto es el ahorro total o neto en dolares USA, es de - \$ 2095.17 en el doceavo año de operación. Es decir, la recuperación de la inversión se realiza al año 12.

Evaluación en Máxima Demanda-Capacitores Conmutables

En el cuadro 22 se muestran los resultados del flujo de carga del alimentador B-6 en condiciones de carga de máxima demanda, obteniéndose hasta 9,445 voltios de tensión en el punto mas alejado del circuito troncal. Esto sin considerar la instalación de capacitores fijos determinados anteriormente. Con un total de 224.78 Kw de pérdidas de potencia.

En el cuadro 23 se considera la instalación de los 2 capacitores fijos, con lo cual se mejora la tensión en el último punto a 9,518 voltios (ver figura 24)

Bajo esta consideración se procede a efectuar el cálculo de optimización de capacitores partiendo de la localización precalculada de los capacitores fijos, obteniéndose los siguientes resultados:

	Dist.Equivalente	Corriente Cap. P.U.
1er Capacitor	0.90	0.382
2do Capacitor	0.52	0.530

En el cuadro 25 se muestra la nueva función corriente reactiva, la misma que se grafica en la figura 23.

Los resultados del flujo de carga para esta condición se muestra en el cuadro 26. obteniéndose una tensión mínima de 9,619 Voltios.

En la figura 24 se muestra el perfil de tensiones en máxima demanda a lo largo del alimentador.

Finalmente, en el cuadro 27 se observa el tamaño de los capacitores conmutables y los resultados de reducción de pérdidas de potencia y energía y el ahorro total de 2842.55 dolares USA.

Finalment , se concluye que el beneficio económico por la instalación de capacitores es de \$ 747.38 al doceavo año de operación (periodo de recuperación de capita 12 años).

4.3 Comparación de alternativas - Capacitores / Reforma en redes 10 Kv

La alternativa de utilización de capacitores para dar una solución técnica a problemas de caída de tensión excesiva y/o sobrecargas en redes, resulta ventajosa en comparación con la alternativa de efectuar reforma en redes.

Para el caso del alimentador A-1 , la alternativa de efectuar un refuerzo en redes (cables en paralelo o aumento de sección de conductor) no soluciona el problema existente. Sin embargo, se considera la instalación de nuevas redes que asuman parcialmente la carga del radio de influencia del alimentador A-1.

La reforma de redes considera la instalación de 2,330 mts de conductor aldrey de 125 mm², siendo la comparación de alternativa como sigue :

ALTERNATIVA	IMPLEMENTACION	COSTO INSTALAC.
Capacitores	900 Kvar Fijos 900 Kvar Conmut.	\$ 9,000.00 \$ 11,700.00
Reforma en redes 10 Kv.	2,330 mts (125mm ²)	\$ 44,549.00

La relación de inversión es de 1 a 2.15 favorable a la instalación de capacitores.

Los beneficios técnicos para las alternativas serán:

TENSION EN SUBESTACION MAS ALEJADA (TRONCAL)			
	Mínima Demanda		Máxima Demanda
Capacitores	9,666	Voltios	9,549 Voltios
Reforma en redes 10 Kv.	9,731	Voltios	9,690 Voltios

Para el caso del alimentador B-6 se muestra continuación, la comparación de la alternativa de efectuar una reforma en redes (refuerzo de redes) para dar solución la excesiva caída de tensión (9,445 Voltios en máxima demanda) :

ALTERNATIVA	IMPLEMENTACION	COSTO DE INST.
Capacitores	900 Kvar fijos	\$ 9,000.00
	1,050 Kvar conmut.	\$ 13,650.00
Reforma en redes 10 Kv.	1,400 mts (120mm ²)	\$ 119,252.00
	820 mts (70mm ²)	\$ 48,191.00

La relación de inversión es de 1 a 7.4 favorable a la instalación de capacitores.

Los beneficios técnicos para las alternativas serán:

TENSION EN SUBESTACION MAS ALEJADA (TRONCAL)			
	Mínima Demanda		Máxima Demanda
Capacitores	9,765	Voltios	9,619 Voltios
Reforma en redes 10 Kv.	9,733	Voltios	9,541 Voltios

CAPITULO 5 DISEÑO

5.1 Componentes y Configuración Interna

Los condensadores vienen introducidos en tanques rectangulares de acero inoxidable. En la actualidad utilizan una película de polipropileno como elemento dieléctrico (anteriormente se utilizaba papel y polipropileno). Este material va entre electrodos, que están constituidos por láminas de aluminio; todo es enrollado y prensado formando un paquete muy compacto. Este material en conjunto es deshumedecido y desgasificado en una cámara de vacío y finalmente impregnado de un fluido llamado NO-PCB.

El PCB (polychlorinated biphenyls) ha sido utilizado anteriormente como líquido impregnante por más de medio siglo, trayendo consigo una serie de problemas, siendo una de los más perjudiciales la explosión del tanque del condensador. Este líquido es inflamable y cuando se recalienta despiden gases, los cuales aumentan la presión interna en el tanque del capacitor produciendo la rotura y hasta la explosión del tanque.

El PCB es un líquido que no se degrada biológicamente, tal es así que la comisión controladora de contaminación

ambiental de los EE.UU. de Norteamérica prohibió su uso.

Posteriormente se introdujeron otros líquidos impregnantes, los que son conocidos como NO-PCB. Estos productos tienen buenas propiedades dieléctricas, además posee las siguientes características principales:

- Son biodegradables (60 % en 24 h y el 100 % en menos de 7 días)
- Sus gases no son venenosos (toxicidad muy baja)
- Punto de inflamación: aproximadamente 150 C
- Es combustible, por lo cual los condensadores inservibles pueden ser fácilmente destruidos por incineración.

Estos impregnantes NO-PCB, en la actualidad, reciben un nombre especial por cada fabricante:

Mc BRAW EDISON	EDISOL II
WESTINGHOUSE	WEMCOL
GENERAL ELECTRIC	DIELECTROL III
ASEA	FARADOL

Con estos fluidos se han reducido las pérdidas dieléctricas, las que son tan bajas que varían entre 0.15 y 0.30 Watts/KVAR. Incluyendo las pérdidas inevitables en los fusibles y en la resistencia de descarga.

Asimismo, la variación de la capacidad en función de la temperatura ambiente ha disminuido, manteniendo más

PARTES DE UN CAPACITOR

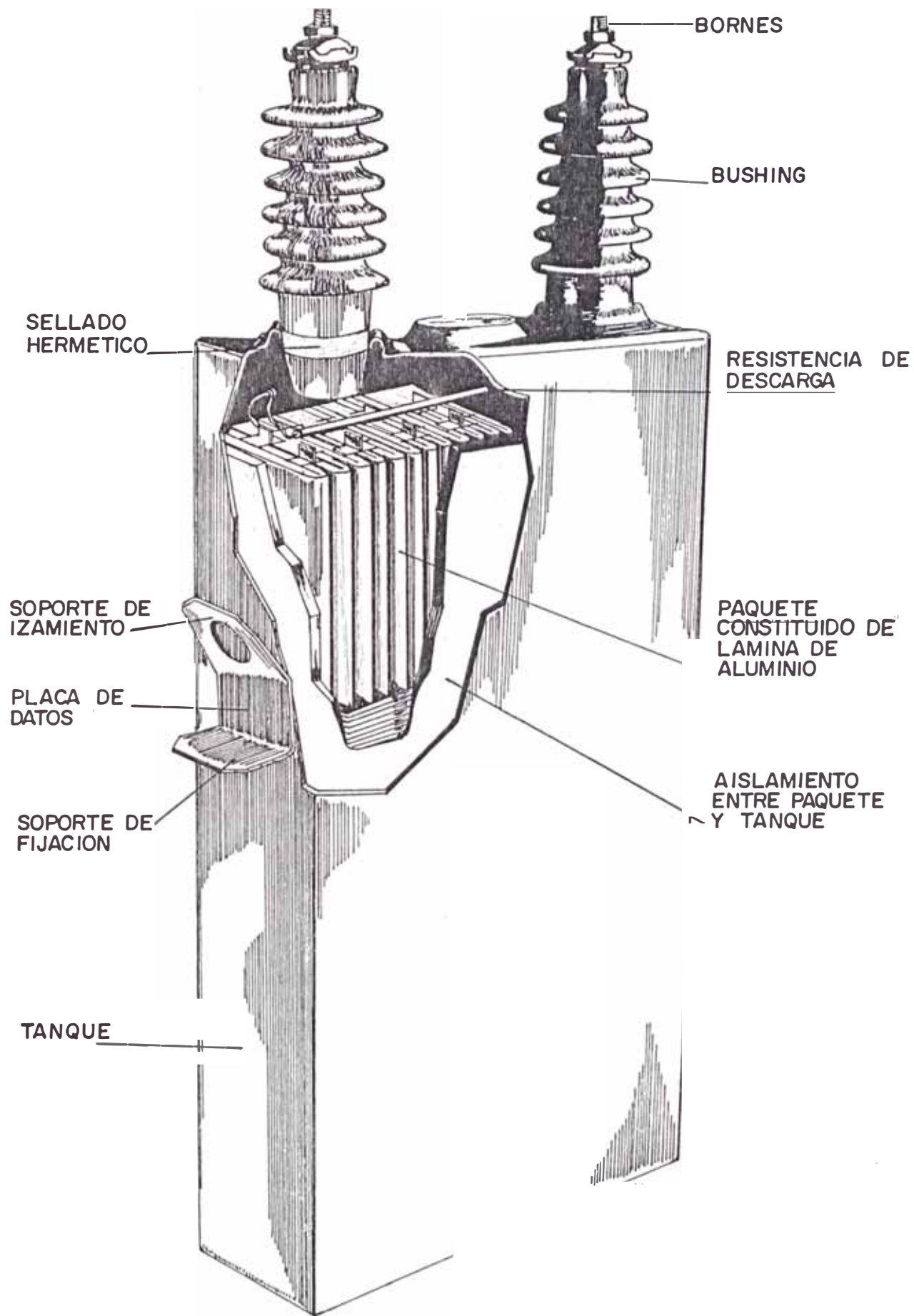


FIGURA 25

constante la potencia generada.

Por otro lado el capacitor tiene una resistencia de descarga interna que reduce el voltaje entre terminales de 50 voltios o menos dentro de 5 minutos después de la desconexión.

La figura 25 muestra en detalle la configuración interna de un capacitor.

Las normas internacionales para el diseño de capacitores shunt son las siguientes:

-NEMA CP-1 1976 "Shunt Capacitors"

-ANSI C55-1 "Shunt Power Capacitors"

-IEC 70 "Power Capacitors"

5.2 Temperatura de Operación

Los capacitores son diseñados para operar a temperaturas altas, ya que está sometidos a elevadas tensiones dieléctricas y operan continuamente a plena carga, lo cual induce mantener a una temperatura alta la unidad.

Los niveles de los capacitores son basados en maximas temperaturas ambiente, asumiendo adecuada disipación por radiación y convección de calor.

La ventilación en cabina (SS.EE.) y la ubicación de la unidad deben permitir circulación de aire alrededor de

cada unidad, siendo esto más importante para unidades montadas en fila.

La temperatura de capacitores sujetos a radiación solar o de alguna fuente de alta temperatura, puede ser incrementado dependiendo de la temperatura ambiente, la intensidad y duración de la radiación, en estos casos puede ser necesario proteger al capacitor o emplear capacitores con alto voltaje nominal.

El siguiente cuadro muestra las temperaturas ambiente considerando que los capacitores operan en forma continua, la intemperie con ventilación ilimitada, expuestos a los rayos del sol y en cabinas sin ventilación:

CUADRO NRO.28

TIPO DE MONTAJE	TEMPERATURA AMBIENTE °C	
	24 HORAS PROMEDIO	NORMAL ANUAL
Capacitor solo	46	35
Capacitor en una sola fila	40	25
Capacitores en varias filas y varios pisos	35	20
Capacitores en cabina de metal o en S.E. (sin ventilación)	35	20

El promedio aritmético de 24 horas de lecturas horarias durante el día más caliente.

Fuente de información: NORMA ANSI C 55.2-1973

Los catálogos indican que los capacitores están fabricados con normas NEMA y operan satisfactoriamente en temperaturas ambiente de -40 C a 46 C.

La temperatura especificada por los fabricantes la temperatura de operación debe ser chequeada por el usuario de tiempo en tiempo.

5.3 Niveles de Aislamiento, Capacidades Disponibles, Dimensiones y Pesos

Se han tomado como referencia 3 fabricantes (Mc Graw Edison, General Electric y Westinghouse).

Segun catalogos se fabrican capacitores con 2 bushing con un BIL de 95 kV hasta tensiones de 12kV .. Para tensiones superiores a 12 kV, los capacitores tienen un solo Bushing de 125 kV. de BIL.

La conexión triangulo o estrella sin neutro puesto tierra consideran unidades con 2 bushing de 95 kV de BIL y para conexión estrella con neutro puesto tierra considera unidades con 1 solo bushing de 125 kV. de BIL.

Se fabrican capacitores monofasicos con capacidades de 50, 100, 150, 200, 300 y 400 kVar. También hay unidades trifásicas que se usan para bancos con potencias muy grandes del orden de 3600 kVar. En nuestro caso es recomendable usar monofásicos conformando bancos.

Es importante hacer notar que el precio de la unidad

esta en proporción con la potencia (kVar) y no con la tensión. Por ejemplo un capacitor de 300 kVar tiene el mismo precio para diferentes tensiones nominales, sean estas 2,400 V, 9,960 V, o 12,470 V.

Las dimensiones y pesos son función de los kVar y del nivel de aislamiento y no de la tensión. Por ejemplo una unidad de 100 kVar. con 95 kV de BIL con 6640 V de tensión nominal, tiene las mismas dimensiones que uno de 100 kVar con 95 kV de BIL y 12,470 V de tensión nominal.

Los cuadros 29,30,31,32,33 y 34 muestran las tensiones, capacidades, dimensiones y pesos de tres fabricantes (Mc. Graw Edison, General Electric y Westinghouse). Nótese que tienen estandarizadas las tensiones: 6640, 7200, 7960, 8320, 9960, 11400, 12000, 12470 Voltios.

CUADRO NRO.29

FABRICANTE : MC. GRAW EDISON

TENSION NOMINAL VOLTIOS	CAPAC. BIL kV.	CONEXION DE CAPACITORES	
		TENSION LINEA A LINEA (Voltios) Conexión Delta	CONEXION ESTRELLA (Voltios) Conexión Estrella
6,640	95	6,640	11,500
7,200	95	7,200	12,470
7,620	95	7,620	13,200
7,960	95	7,960	13,800
9,960	95	9,960	17,250
12,470	95	12,470	21,600

Los rangos de voltaje son para unidades de 2 bushing con conectores de ranuras paralelas. Se fabrica con un solo bushing de 125 kV. para tensiones iguales o mayores 12,470 Voltios y sólo son recomendables para conexión en estrella.

CUADRO NRO.30

FABRICANTE MC. GRAW EDISON

KVAR	DIMENSIONES (mm)								PESO APROX Kgs.
	A	B	C	D	E	F	G	H	
100	650	440	250	430	102	343	229	30	25
150	650	440	250	430	133	343	397	30	31
200	840	630	250	430	114	343	397	30	39.2
300	840	630			133	559		30	52.4

Ver figura 26

CUADRO NRO.31

FABRICANTE : GENERA ELECTRIC

TENSION NOMINAL CAPAC. VOLTIOS	BIL KV.	CONEXION DE CAPACITORES	
		TENSION LINEA A Conexión Delta	LINEA (Voltios) Conexión Estrella
6,640	95	6,640	11,500
7,200	95	7,200	12,470
7,620	95	7,620	13,200
7,960	95	7,960	13,800
8,320	95	8,320	14,400
9,960	95	9,960	17,250
12,470	95	12,470	21,600

Los rangos de voltaje son para unidades de 2 bushing con conectores de ranuras paralelas. Se fabrica con un solo bushing de 125 Kv. para tensiones mayores 15,000 Voltios.

CUADRO NRO.32

FABRICANTE GENERAL ELECTRIC

KVAR	DIMENSIONES (mm)								PESO APROX Kgs.
	A	B	C	D	E	F	G	H	
50	536	295	190	398	102	343		33	18.2
100	616	375	190	398	127	343		33	27.4
150	686	445	190	398	146	343		33	34.2
200	908	667	311	519	127	343		33	43.4
300	908	667	311	519	159	343		33	54.7
400	908	667	311	519	216	343		33	75.2

Ver figura 26

DIMENSIONES DE CAPACITORES

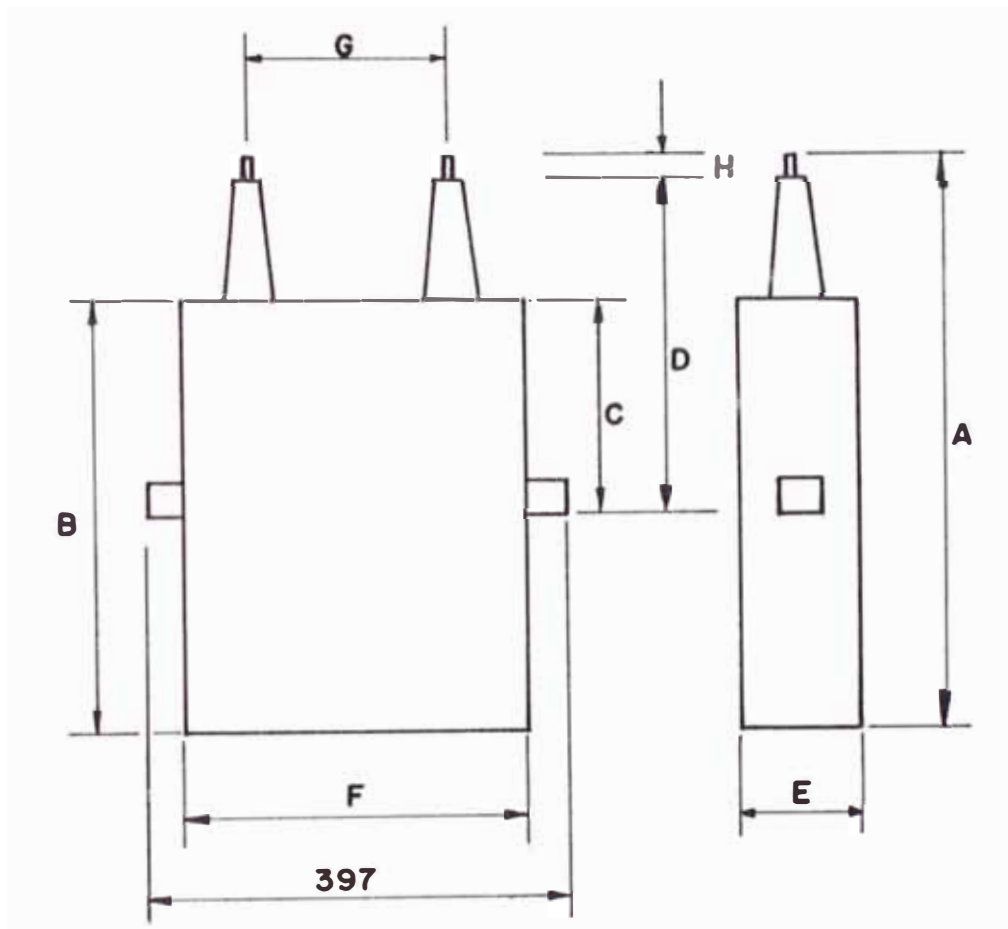


FIGURA 26

CUADRO NRO.33

FABRICANTE WESTINGHOUSE

TENSION NOMINAL CAPAC. VOLTIOS	BIL KV.	CONEXION DE CAPACITORES	
		TENSION LINEA A Conexión Delta	LINEA (Voltios) Conexión Estrella
6,640	95	6,640	11,500
7,200	95	7,200	12,470
7,620	95	7,620	13,200
7,690	95	7,690	13,300
8,320	95	8,320	14,400
9,540	95	9,540	16,500
9,960	95	9,960	17,250
11,400	95	11,400	19,740
12,000	95	12,000	20,800
12,470	95	12,470	21,600

Los rangos de voltaje son para unidades de 2 bushing con conectores de ranuras paralelas. Se fabrica con un solo bushing de 125 Kv. para tensiones mayores 15,000 Voltios.

CUADRO NRO.34

FABRICANTE WESTINGHOUSE

KVAR	DIMENSIONES (mm)								PESO APROX Kgs.
	A	B	C	D	E	F	G	H	
50	455	235		367	105	343	216	35	15
100	573	356		519	105	343	216	35	22
150	783	565		519	105	343	216	35	32
200	783	565		519	130	343	216	35	40

Ver figura 26

5.4 Tipos de Conexión

Teniendo en cuenta que la potencia real inyectada via capacitores se obtiene multiplicando los KVAR nominales del capacitor por el cuadrado de la relacion entre la tension real de al barra (VR), a la cual esta conectada el capacitor, y la tension nominal del capacitor (Vc),

siendo esta relacion menor a la unidad. Lo mencionado se expresa en la formula siguiente :

$$KVAR_{Iny} = KVAR_{Nom} \left(\frac{V_R}{V_c} \right)^2 \quad (43)$$

Se tiene que ver que la relacion $\left(\frac{V_R}{V_c} \right)^2$ sea cercana a la unidad para aprovechar al maximo los KVAr. La expresion 43 ha sido demostrada anteriormente en el Capitulo 2 - acápite 2.6.1.

Si por ejemplo la conexion fuera en estrella tendríamos que instalar en cada fase, de los cuadros 29,31 o 33, capacitores con 6640 Voltios de tension nominal, con lo cual la tension V_c de la expresion 43 seria 11400 Voltios. Entonces la relacion $\left(\frac{V_R}{V_c} \right)^2$ tendria un valor cercano a la unidad, mayor que con cualquier otra tension nominal, y se aprovecharia mayor KVAr instalados.

El inconveniente de esta conexion esta en que como nuestra red no tiene el neutro puesto a tierra, puede ocurrir un desplazamiento del neutro por desbalance de carga, lo cual conlleva a una elevacion de tension hasta valores proximos a 10 kV. entre una linea y neutro. Se han realizado mediciones en subestaciones convencionales donde se comprobo el desplazamiento del neutro.

Lo indicado en le párrafo anterior se comprueba seguidamente. Sea un sistema trifasico como se muestra en la figura 27, segun la ley de kirchoofs la sumatoria

SISTEMA TRIFASICO DESBALANCEADO

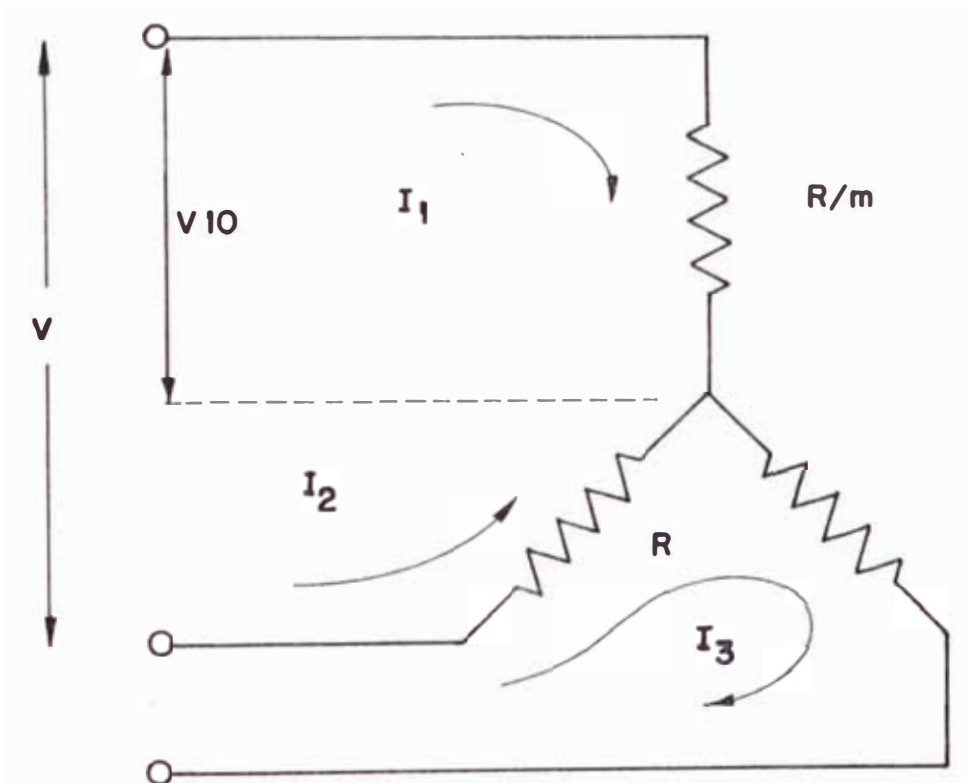


FIGURA 27

de corrientes en el neutro sera igual a cero

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (44)$$

Se esta suponiendo un sistema de corriente desbalanceado y resistencia constante .

La tension de linea viene dada por

$$V = I_1 \cdot (R/m) - (I_2 \cdot R) \quad (45)$$

donde m es un numero real .

Luego considerando el desbalance de fase con las siguientes características

$$I_1 = I$$

$$I_2 = I/2$$

$$I_3 = I/2$$

reemplazando estos valores de corriente

$$I_2 = -I/2$$

$$I_3 = -I/2$$

de la ecuacion de tensiones 45 se obtiene:

$$I_1 = V \cdot 2m / R \cdot (2+m)$$

luego

$$V_{1-0} = R \cdot I_1 / m = 2 \cdot V / (2+m)$$

$$V_{2-0} = R \cdot I_1 / 2 = m \cdot V / (2+m)$$

$$V_{3-0} = R \cdot I_1 / 2 = m \cdot V / (2+m)$$

En experiencia realizada se ha obtenido los siguientes resultados:

V_{R-0}	=	5 Voltios	V_{R-t}	=	$220/\sqrt{3}$ Volt
V_{S-0}	=	200 Voltios	V_{S-t}	=	$200/\sqrt{3}$ Volt

$$\begin{array}{l} V \\ T-O \end{array} = 200 \text{ Voltios}$$

$$\begin{array}{l} V \\ T-t \\ V \\ O-t \end{array} = \begin{array}{l} 200/\sqrt{3} \text{ Volt} \\ \\ 140 \text{ Volt} \end{array}$$

La potencia del conjunto para las diferentes tipos de conexiones estan dadas por :

$$\begin{array}{l} \text{1 fase} \\ QC \\ QC \end{array} = \begin{array}{l} \\ W \times C \times V^2 \times 10^{-3} \\ I \times V \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Conexion Estrella} \\ QC \\ QC \end{array} = \begin{array}{l} \\ W \times C \times V^2 \times 10^{-3} \\ \sqrt{3} \times I \times V \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Conexion Triangulo} \\ QC \\ QC \end{array} = \begin{array}{l} \\ 3 \times W \times C \times V^2 \times 10^{-3} \\ \sqrt{3} \times I \times V \end{array}$$

Seguidamente, si se instalan capacitores de 6640 V. conectados en estrella, ante un desbalance de carga (o quema de 1 fase) el condensador seria sometido tensiones superiores su nominal, lo cual podria producirles daños irreparables.

De lo mencionado, se desprende que lo recomendable para nuestro sistema es la instalacion de condensadores conectados en triangulo con tension nominal igual o ligeramente superior a 10 kV., para aprovechar al maximo la capacidad de los equipos que se adquieran. Segun los catalogos de los fabricantes, los valores de tension mas proximos a 10 kV. son : 9.96 kV y 11.4 kV (WESTINGHOUSE), 9.96 kV Y 12.47 kV (MC GRAW EDISON Y GENERAL ELECTRIC), por razones de costo no hay problemas porque un capacitor de 100 KVAR cuesta igual sea su tension nominal 6.64 kV, 9.96 kV, 11.4 kV, o 12.47 kV.

5.5 Operación Normal.-

Los capacitores operan sin peligro al 135 % de su potencia nominal. Se considera que esta sobrecarga es debida a ;

- 1.- KVAR causados por exceso de voltaje frecuencia nominal (la potencia reactiva entregada es directamente proporcional al cuadrado del voltaje).
- 2.- KVAR causado por armonicos de tensión y otras frecuencias superpuestas a la frecuencia nominal.
- 3.- KVAR atribuibles a las tolerancias de fabricación.

5.6 Operación con Sobrevoltajes.-

Los capacitores son diseñados para permitir una operación continua del banco, con tensiones hasta el 110 % de la tensión nominal. A 110 % de tensión, los KVAR se incrementan en un 21 % de su capacidad .

Ocasionalmente sobrevoltajes causados por ondas de switcheo pueden exceder facilmente el 110 % por periodos cortos.

Los capacitores pueden operar con voltajes superiores al nominal pero en condiciones de emergencia y casos no frecuentes. La magnitud de estos sobrevoltajes pueden ser tolerados sin variar su tiempo de vida, pero esta depende también de la variación de cada sobrevoltaje, el numero de veces y la temperatura del capacitor (de la experiencia de fabricantes).

Los valores que se muestran en el cuadro a continuación son basados en experiencias de muchos años, con sobrevoltajes ocurridos de 200 a 300 veces durante la vida del capacitor.

CUADRO NRO.35

Tiempo de duracion	Factor que multiplica al voltaje nominal
1/2 ciclo	3.0
1 ciclo	2.7
15 ciclos	2.0
60 ciclos (1seg)	1.75
15 segundos	1.4
1 minuto	1.3
5 minutos	1.2
30 minutos	1.15

5.7 Operación con Sobrecorriente.-

Los capacitores no deben operar por ningun motivo con corrientes que excedan el 30 % de la corriente nominal a voltaje y frecuencia nominal.

Cuando un banco es energizado, tienen lugar fenomenos especiales; si la tensión pasa por su valor de cresta precisamente en el momento de efectuar la conexión, se establece una intensidad de corriente mucho mayor que la

corriente estacionaria. Esto se muestra en la figura 28.

En el caso que dos o mas bancos son energizados de la misma barra, pueden presentarse corrientes de irrupción excesivamente elevadas. Los bancos ya energizados descargan sobre los bancos que se energizan y causan corrientes de irrupción de elevada magnitud.

La frecuencia de la corriente de irrupción puede ser de varios miles de ciclos, pero su duración sera menor que medio ciclo de 60 Hz.

Los fabricantes en sus catalogos indican que los capacitores satisfacen las condiciones de irrupción, pero también indican que en ciertos casos es necesario utilizar un dispositivo llamada "INRUSH CURRENT-LIMITING REACTORS"

Estos dispositivos son reactores que limitan la corriente transitoria de irrupción, durante la operación de conmutación del banco de capacitores. Los reactores son ubicados en serie con los switches y son ocasionalmente montados directamente en la barra del capacitor. Se fabrican de 135 a 400 Amp. como corriente máxima, pero se pueden colocar en paralelo admitiendo corrientes mayores; esto último reduce la reactancia equivalente.

Para nuestro caso recomendamos la utilización de estos reactores para bancos fijos y bancos conmutables ya que inclusive eliminan el problema de resonancia y protegen al banco de capacitores.

5.8 Oil Switches

Son dispositivos que se utilizan para apertura y cierre de bancos de capacitores. Los hay monofásicos y trifásicos; han sido diseñados para utilizarse en instalaciones aéreas y en cabinas, en redes de distribución.

Actúan por medio de resortes que son cargados por un motor que opera a 120 o 240 V de tensión alterna con 60 Hz.

Los switches pueden ser operados manualmente. También operan en forma automática mediante dispositivos de control que hacen actuar al switch en función de la tensión, corriente, temperatura o tiempo.

Operan con temperatura ambiente entre -30 C y +40 C, a altitudes que no excedan los 1000 m.s.n.m.

Se fabrican con corrientes nominales de 200 y 400 A. para tensiones de 14.4 Kv., para nuestros requerimientos

es suficiente el de 200 A. A continuación se presenta el cuadro 36, donde se aprecia los máximos KVAR que pueden ser switcheados por un switch de 200 A.

•••••

CUADRO NRO.36

Amperios	BIL	Voltaje	KVAR
200	95	2400	600
		4160	1050
		4800	1250
		7200	1850
		7960	2100
		12470	3250
		3200	3450
		13800	3600
		14400	3600

En el apéndice C.1. se muestra los catálogos de 2 fabricantes (MC GRAW EDISON y WESTINGHOUSE) y una tabla (Norma ANSI C37.66-1969), donde se indican las características eléctricas de los switches. De dichas tablas puede verse que la corriente asimétrica de cortocircuito, para el switch de 200 A nominales, es 9 Ka. Debido que los bancos de capacitores serán instalados en circuitos troncales, donde las corrientes de cortocircuitos superan los 9 Ka., se recomienda se protejan los bancos con fusibles limitadores de corriente.

Los switches monofásicos son recomendados para bancos de capacitores fijos.

Los fabricantes no indican la longitud de la línea de fuga de los bushing de los switches standard, pero si el usuario requiere mayor línea de fuga, se fabrican bushing con 17 pulgadas. Nuestro requerimientos son 13 pulgada (330 mm) de línea de fuga. (referencia 19)

Cada fabricante produce varios tipos de switches, pero los mas indicados para nuestro caso son:

CUADRO NRO.37

Fabricante	Tipo de Switch	Año de Catálogo
Mc Graw Edison	Tipo NR	1979
General Electric	Tipo FKC-2	1985
Westinghouse	Tipo CSL	1972

Las dimensiones y pesos de los 2 tipos de switches se muestran en el Apendice C.1.

Los switches trifásicos son utilizados para bancos en paralelo. Pueden ser operados manualmente o en forma automática a través de sensores de corriente, tensión o tiempo

5.9 Tipo de Instalación.-

Los bancos de capacitores pueden instalarse de 2 formas ; en poste o en cabina.

Instalación en Postes.-

Se consideran bancos de capacitores armados en paquetes compactos que van desde 300 a 1800 KVAR. Estos

paquetes están montados en diferentes posiciones según sea el armado; lo expresado se muestra en detalle en el Apéndice C.2

Toda la estructura del armado es de aluminio para evitar un excesivo peso del paquete. Es importante tener en cuenta que estos armados son para instalarse en poste de madera, para nuestro caso, en postes de concreto armado (si se perfora el poste perdería consistencia).

El usuario puede solicitar el paquete armado con los respectivos kVar, pero también se puede adquirir los capacitores en forma independiente y hacer el montaje como se crea conveniente.

La tabla continuación nos indica los pesos de los diversos armados con capacitores de 100, 150, 200 y 300 kVar. Se ha tomado como referencia el catálogo de la McGraw Edison.

CUADRO NRO.38

Capacidad de Armado kVar	Capacidad por cada unidad			
	100 kVar	150 kVar	200 kVar	300 kVar
300	156 kg	--	--	--
450	--	186	--	--
600	239	--	213	--
900	321	299	--	312
1200	--	--	353	--
1350	--	412	--	--
1800	--	--	493	537

Instalación en Cabina.-

Este tipo de instalación es necesario cuando el sistema de distribución es subterráneo.

Se fabrican cajas metálicas modulares donde están instalados los capacitores, switches y fusibles. Estas cajas son de diferentes tamaños y están catalogadas en tres categorías : Pequeñas (de 1200 a 1800 kVar), medianas (de 2400 a 4800 kVar) y grandes (mayor a 6000 kVar, dependiendo del sistema de voltaje). Se muestran catálogos en el Apéndice C.3.

5.10 Dispositivos de Control de Switches Switching Controls) Para Bancos Conmutables

La actuación automática de los switches es proporcionada por dispositivos de control. Estos dispositivos actúan en función del voltaje, corriente, temperatura o tiempo. Los kVar que el sistema necesita pueden ser controlados por una de estas variables ; para requerimientos especiales los controles básicos pueden utilizarse en forma combinada. Para el caso nuestro se utilizará el control del switch por medio de voltaje.

La Mc Graw Edison tiene 2 dispositivos electrónicos de control por voltaje, el tipo SOCKET MOUNTED de un solo paso y el CABINET MOUNTED que puede ser de 1,2,3 o 4 pasos.

5.10.1 Control de voltaje electrónico (SOCKET MOUNTED)

Es un dispositivo de un solo paso.

Cuando el nivel de voltaje de un sistema decrece y requiere de KVAR, el sensor de tensión puede proporcionar una regulación efectiva del voltaje del sistema por medio del banco de capacitores.

El control de voltaje SOCKET MOUNTED es diseñado para sistemas donde el voltaje en máxima demanda es menor que el voltaje en mínima demanda.

Este dispositivo cuenta con una anchura de banda de ± 1 Voltios a ± 6 Voltios. Esta anchura de banda debe de ser ajustada de tal forma que no se permitan excesivas operaciones del switch, además anchuras de banda muy cortas pueden causar oscilación en el sistema.

Tienen también un relé de carga y un relé de retardo, con un valor standard de 60 s. ; este relé permite ignorar las variaciones transitorias de tensión, evitando la operación de los switches y posibles perturbaciones del sistema.

Estos controles pueden ser montados en cualquier posición y las condiciones ambientales (humedad) no afectan al circuito sensor ya que es un circuito en estado solido. En el Apendice C.4 se muestra copia de catálogos y dimensiones.

5.10.2 Control de Voltaje Electronico(CABINET MOUNTED)

Tiene los mismos componentes y características que el SOCKET MOUNTED, se fabrican de 1,2,3 y 4 pasos.

De un solo paso: puede operar manual o automáticamente. Cuando el dispositivo es de un solo paso, al momento de actuar conecta o desconecta todo el banco; cuando el circuito sensor siente la caída de tensión, conecta todo el banco.

De pasos multiples pueden ser de 2,3 y 4 pasos.

El control de pasos multiples tiene el mismo circuito sensor en estado solido que el de control simple o de un solo paso, la diferencia esta en que el de pasos multiples tiene un circuito de control de switch adicional consistente en relé de retardo y relé de carga

por cada paso.

Supongamos que tenemos un banco de 1200 kVar, el cual queremos conmutarlo con un dispositivo de control de 4 pasos. Para lograr tal objetivo, se tiene que contar con capacitores de 100 kVar, conectados cuatro unidades en paralelo por fase, de tal forma que el banco quede dividido en 4 grupos de 300 kVar cada uno.

De acuerdo a los requerimientos del sistema, primero actuaría el primer paso haciendo accionar el relé conectado 300 kVar. a la red, si el sistema solicitara mas kVar. inmediatamente actuaría el segundo paso inyectando a la red 300 KVAR mas, y así progresivamente hasta llegar al cuarto paso inyectando los 1200 kVar.. En caso contrario si la tensión aumenta, se desconectaría automáticamente los kVar en exceso.

Como podrá notarse este sistema de control de pasos multiples resulta eficiente, ya que se inyectaria la red los kVar suficientes para aumentar la tensión.

A mayor cantidad de pasos el control resulta

fino, pero esto demanda mayor cantidad de unidades de capacitores por lo tanto mayor costo y sobre todo mas espacio. Por ejemplo para conmutar un banco de 1200 kVar con 4 pasos se necesitan 12 unidades de 100 kVar con 4 pasos o se necesitan 12 unidades de 100 kVar., conectados cuatro en paralelo por cada fase. Si queremos conmutar un banco de 1200 kVar con 2 pasos solamente se necesitan 6 unidades de 200 kVar, conectados dos en paralelo por cada fase.

Es importante hacer notar que por cada paso se necesita un dispositivo de apertura y cierre (Oil Switch trifásico). En el Apendice C.4 se muestran las copias de los catálogos y sus dimensiones

5.11 Protección.-

Los fusibles son recomendados para proteger fallas en el capacitor y prevenir casos de ruptura del tanque. En efecto la ruptura del recipiente es causada generalmente por el incremento de la presión interna, debido al gas formado por el arco durante la falla.

Ahora que se utilizan nuevos líquidos impregnantes, todos combustibles y sin PCB, de una manera casi universal, se ha hecho cada vez mas necesario evitar la explosión del recipiente con el consiguiente riesgo de incendio. Por otro lado los condensadores son sometidos a

muy altos requerimientos de aislamiento, ya que en el dieléctrico hay a menudo campos eléctricos elevados y teniendo en cuenta estos altos gradientes, y las grandes superficies de aislamiento el riesgo de una perforación es una realidad que no puede ser evitada, por lo que debe emplearse un sistema de protección eficaz y seguro.

Un banco de condensadores comprende normalmente varias unidades y la finalidad de una protección es desconectar la unidad defectuosa, antes de que se desarrollen consecuencias peligrosas. Por supuesto también es deseable limitar en lo posible los efectos de la falla.

Generalmente se recomienda que para bancos conectados en estrella con neutro a tierra o triángulo, la capacidad del fusible sea de 165 % la corriente nominal del banco, y de 140% a 150% para bancos conectados en estrella con neutro flotante.

El factor de 165% o 140% se aplica por lo que la corriente que circula a través del fusible usualmente excede la corriente nominal del banco. Esto se debe a que en condiciones reales de operación, el voltaje de operación es superior al voltaje nominal del capacitor, la presencia de armónicos de corriente que circula a través del banco, las tolerancias de fabricación que a veces resulten en valores de capacitancias mayores al

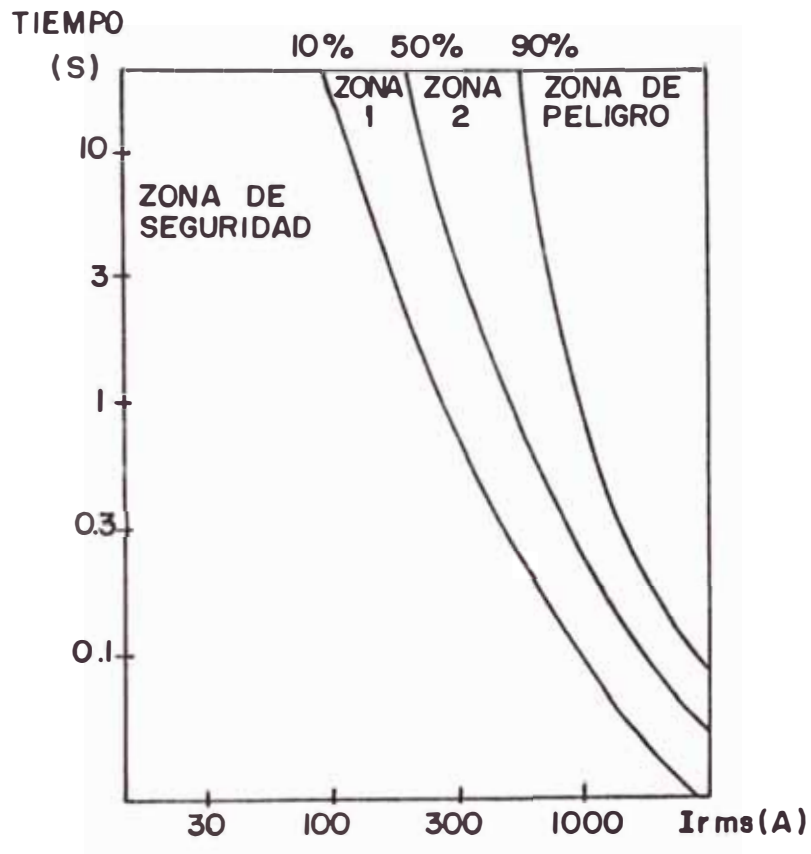
valor nominal, y la corta duración de los transitorios de corrientes producidos por el switcheo y las descargas atmosféricas.

Los bancos conectados en estrella con neutro y en delta admiten considerablemente mas corriente en caso de falla, que un banco en estrella. Esto es debido a que la corriente sería limitada solo por la impedancia del capacitor fallado, mientras que en el caso de un banco en estrella, la corriente sería limitada por la reactancia de los capacitores de las restantes 2 fases.

Los fusibles de expulsión NEMA tipo "K" o "T" son utilizados para la protección de bancos de capacitores. Estos fusibles pueden conducir 150% de su rango nominal, ejemplo los fusibles 50K y 50T pueden satisfactoriamente conducir 75 Amp. en forma continua. Las curvas tiempo-corriente "Total Clearing" del fusible de expulsión deben coordinar con las curvas de ruptura del tanque del condensador; estas curvas se muestran en la figura 31.

La primera curva define el 10% de probabilidad de ruptura del recipiente, la segunda define el 50% de probabilidad y la tercera el 90%. La curva del fusible debe situarse dentro de la zona de seguridad pero muy cerca a la curva de 10% de probabilidad para tener mayor inmunidad a los transitorios.

PROBABILIDAD DE RUPTURA DEL RECIPIENTE



CURVAS DE RUPTURA DEL RECIPIENTE

FIGURA 29

Dentro de la zona de seguridad usualmente, en caso de falla, las unidades no sufren mayores daños mas que hinchaduras ligeras. Es posible que ocurra a veces casos de ruptura como resultado de corrientes de cortocircuito de baja magnitud por periodos largos de tiempo; para evitar tales casos de ruptura el fusible debe coordinar de tal forma que pueda aperturar la falla dentro de 300 seg.

La zona 1 está comprendida entre las curvas de 10% y 50%, en casos de falla el recipiente sufre rajaduras goteando el fluido interno, en la zona 2 ya ocurre violentos casos de ruptura y el zona de peligro muchas veces se rompen con tal violencia que dañan a las unidades adyacentes.

La tabla 1 del catálogo incluido en el Apendice C.5 recomienda fusibles "K" y "T" para bancos conectados en estrella con neutro flotante, y la tabla 2 para bancos conectados en estrella con neutro a tierra y en delta. Todas las recomendaciones coordinan con la zona de seguridad de la curva de ruptura del tanque, excepto los marcados con asterisco.

Para los bancos conectados en estrella con neutro tierra y delta la zona de ruptura probablemente depende de la corriente de falla. La tabla 3 del Apendice C.5

muestra una lista de máxima corriente de falla por varios rangos de fusibles coordinados con la zona de ruptura. El usuario puede realmente evaluar la probabilidad de caso de ruptura para su aplicación particular con esta tabla.

Como ejemplo de la tabla 2; para 1200 KVAR, 12470 V , bancos en estrella con neutro a tierra con unidades de 200 KVAR se recomienda fusibles de 65 K o T.

Usando la tabla 3, el fusible de 65K coordina en zona de seguridad (probabilidad de ruptura menor que 10%) si la corriente de falla es 5400 A o menos, y en la zona 1 (probabilidad de ruptura entre 10 y 50%) si la corriente de falla esta entre 5400 y 7000 A. Si la corriente es mayor que 7000 A , la probabilidad de ruptura es mayor que 50%. Similarmente para un fusible de 65 T, corrientes de falla hasta 1600 A estan en la zona de seguridad corrientes encima 5500 A excederán el 50% de probabilidad de ruptura.

Para aplicaciones donde las corrientes de cortocircuito excedan los limites mostrados en el cuadro 39 se utilizaran fusibles limitadores de corriente para limitar la corriente de cortocircuito.

CUADRO NRO. 39

Unidad de Capacitor	Máxima corriente de falla para fusibles de expulsión
50 KVAR	4000 A
100 KVAR	5000 A
150 KVAR	6000 A
200 KVAR	6000 A
300 o 400 KVAR	7000 A

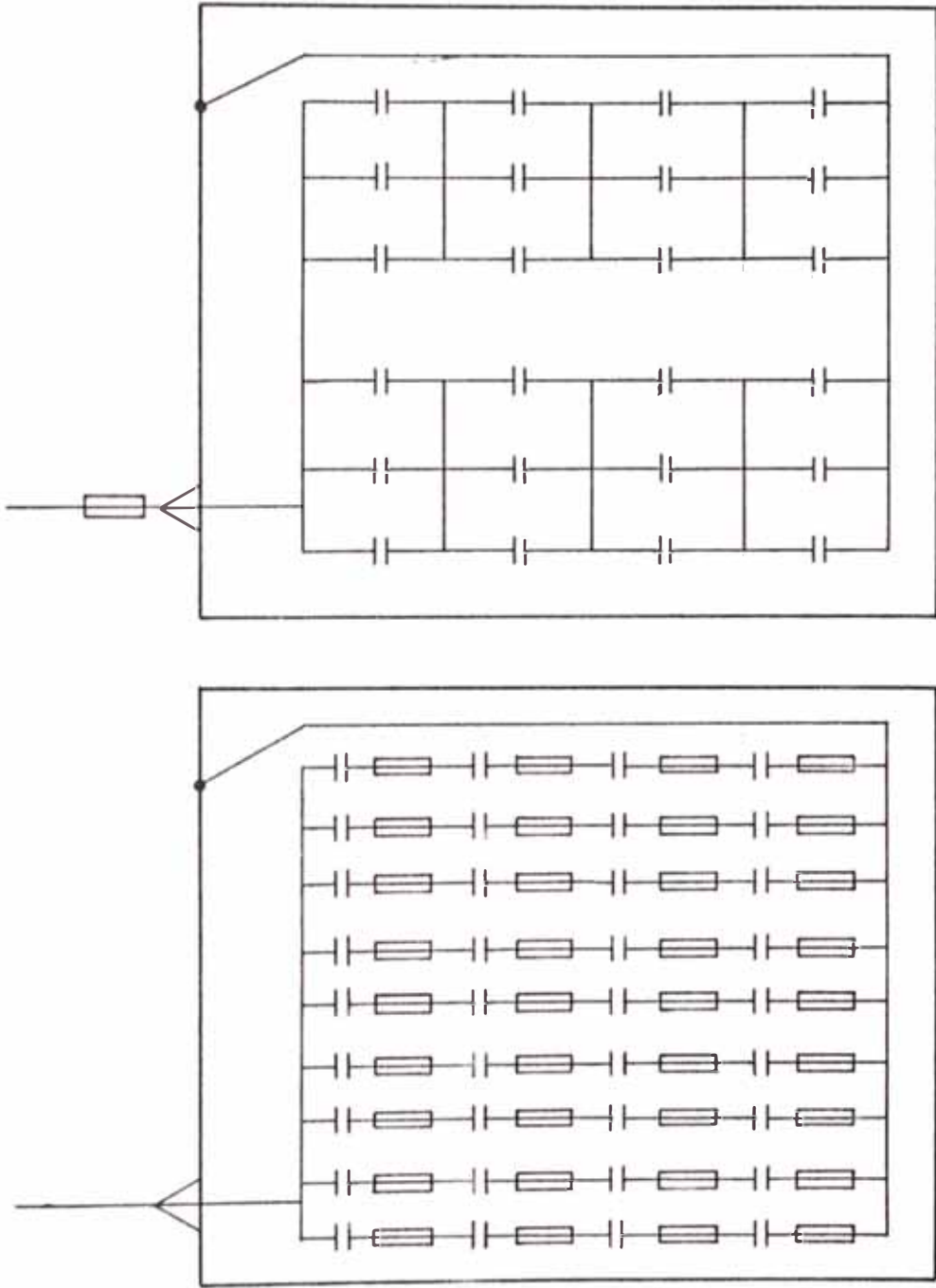
Estos fusibles irán en serie con los fusibles de expulsión.

Para equipamientos que son muy grandes se recomienda fusibles de expulsión para la protección de cada unidad que ofrece un incremento de protección contra casos de ruptura. Otra ventaja es que la falla de una unidad no merma los KVAR de todo el banco.

Capacitores con Fusibles Internos

Cada capacitor, ya sea con fusibles internos o externos, esta formado por un gran número de elementos capacitivos. En una unidad provista de fusibles internos, cada uno de estos elementos esta previsto de su propio fusible en el interior del capacitor. En caso de falla en un elemento, solo este queda desconectado, y en consecuencia la reducción de potencia del capacitor es muy pequeña. Un fusible externo protege el capacitor

PROTECCION INTERNO Y EXTERNO EN CAPACITORES



**CONDENSADOR
INTERNOS**

**FUSIBLES
CONDENSADOR PROVISTO DE FUSIBLE
EXTERNO**

FIGURA 30

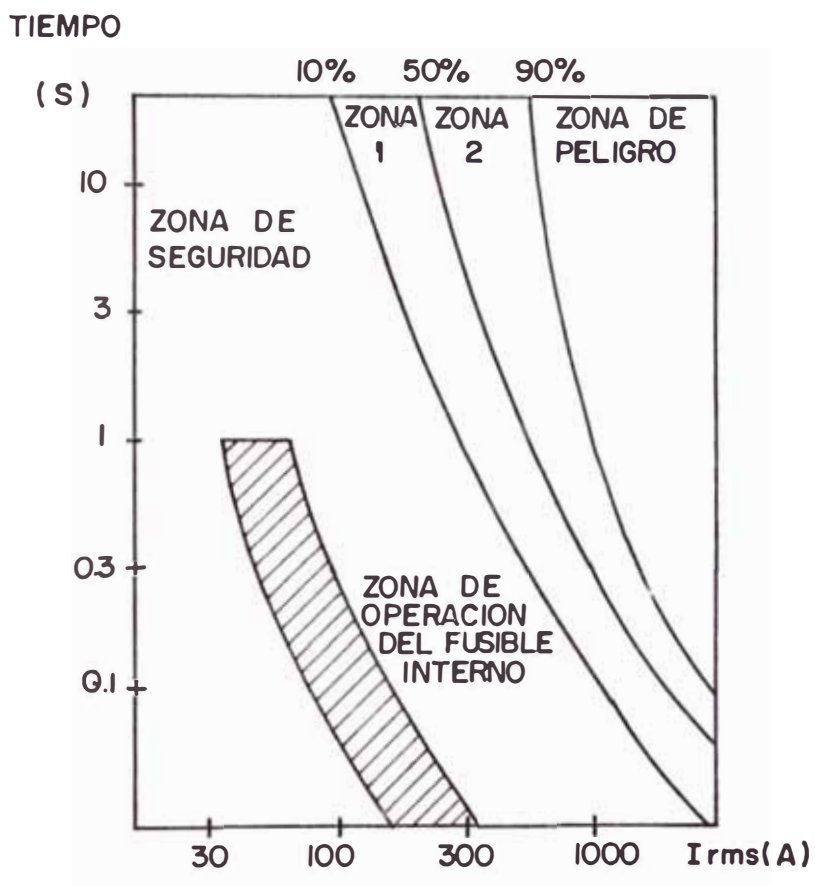
completo y por lo tanto, al actuar, desconecta toda la unidad (ver figura 30).

Los fusibles internos están diseñados para actuar tan pronto como tienen lugar las perforaciones. Diseñando el capacitor con varios elementos en paralelo, se asegura que después de una falla, la corriente a través del fusible aumenta considerablemente, de unas 10 a 15 veces la intensidad nominal, el funcionamiento del fusible tiene lugar en solo unos ciclos.

Después de la desconexión del elemento defectuoso por su propio fusible, el condensador continúa en servicio y la potencia reactiva no es más que un poco inferior.

Debido al gran número de elementos que forman al capacitor, esta reducción es del orden de las centésimas y no es por tanto necesario desconectar el capacitor donde ha fusionado el fusible. La capacidad se mantiene dentro de los límites aceptables de tolerancia y las otras unidades del banco no se ven afectadas. Por el contrario, el capacitor con fusible externo, queda totalmente desconectado para evitar sobretensiones continuas en las otras unidades.

Por otro lado la desconexión instantánea de los elementos perforados por los fusibles internos, no puede



CURVAS DE RUPTURA DEL RECIPIENTE. EL TIEMPO DE FUNCIONAMIENTO DE UN FUSIBLE INTERNO ES ENTRE 1ms Y 1s TRAS LA PERFORACION

mantenerse ningún arco en el interior del capacitor , lo que elimina el peligro de explosión. El funcionamiento del capacitor se mantiene dentro de la zona de seguridad de las curvas NEMA de ruptura del recipiente como se muestra en la figura 31.

Los fusibles internos están completamente protegidos de cualquier influencia ambiental; por ejemplo no hay riesgo de oxidación o de mal funcionamiento debido a la humedad como en el caso de fusibles externos. También economizan un espacio considerable sobre todo al no necesitar la distancia mínima exigida para la expulsión de un fusible externo. Otra ventaja es que ya no se tiene que elegir el fusible externo.

Las unidades defectuosas sólo pueden ser detectadas con un medidor de capacidad. Existe un puente de medida especial, que permite la medida rápida y precisa de cada unidad del banco; por medio de una pinza amperimétrica que se coloca alrededor del borne, se puede efectuar medidas sin desconectar los capacitores. En un banco con fusibles externos, los capacitores defectuosos son fácilmente detectables por su fusible quemado. Sin embargo, para detectar fallas incipientes en el banco es necesario emplear el mismo procedimiento descrito anteriormente en todas las unidades.

CONCLUSIONES

1.- El análisis de los alimentadores de distribución primaria presentados, demuestra que para dar solución a los problemas de caída de tensión, la alternativa de utilización de capacitores tipo shunt es mas ventajosa económicamente frente a la alternativa de efectuar reformas en redes. Asimismo, cabe indicar que se satisfacen con esta alternativa las exigencias técnicas de tensiones permisibles.

En el caso del alimentador A-1 de la SET. Puente, dado que la relación de inversión es de 1 a 2.15 favorable la instalación de capacitores, el proyectista debe de considerar también el incremento de cargas previstas en la zona para la adecuada toma de decisiones, siendo probable la alternativa de reforma en redes como la más ventajosa a mediano plazo.

2.- Adicionalmente, con la instalación de capacitores se obtiene el beneficio de reducir las pérdidas de energía y potencia, que posibilita la recuperación del capital invertido en la instalación de capacitores en un determinado período de tiempo (menos de 13 años para ambos caso).

- 3.- Para redes de distribución primaria 10 Kv. los parámetros de resistencia y reactancia son de magnitudes similares. Esto conlleva, a que la caída de tensión en las redes dependa tanto de la potencia activa como de la reactiva. También, la reducción de las pérdidas de potencia y energía se realiza reduciendo la componente reactiva de la corriente a lo largo del alimentador. Por consiguiente con la aplicación de capacitores se obtendrán mejores resultados para los casos de alimentadores con bajo factor de potencia.
- 4.- Dentro del procedimiento para la aplicación de capacitores en las redes de distribución primaria debe de considerarse el análisis de carga en mínima y máxima demanda, con el objeto de determinar el tamaño y localización óptima de capacitores fijos y conmutables. Esto permite obtener resultados mas satisfactorios, sobre todo en alimentadores cuyo diagrama de carga horario tenga mucha variación.
- 5.- La definición del alimentador equivalente por unidad, como un circuito que posee una resistencia eléctrica uniforme equivalente a la del circuito original, facilita el cálculo de pérdidas de potencia y energía, y de caída de tensión.
- 6.- El método de optimización de capacitores en redes de distribución primaria, da como resultado las siguientes

expresiones :

Localización Óptima

$$F(h_i) = \frac{(k_p + k_e.T)}{(k_p + k_e.T.FC)} \left(\frac{I_{c_i}}{2I_s} + \sum_{k=1}^{i-1} \frac{I_{c_k}}{I_s} \right)$$

donde:

h_i es la localización óptima de capacitor "i"

$F(h_i)$ es la función corriente reactiva para el i-ésimo capacitor ubicado en h_i .

Tamaño óptimo de capacitores fijos

$$\begin{bmatrix} h_1 & h_2 & \dots & h_n \\ h_2 & h_2 & \dots & h_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_n & h_n & \dots & h_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c1} \\ I_{c2} \\ \dots \\ I_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} FACI \int_0^{h_1} I_s.F(x)dx - FACII \\ FACI \int_0^{h_2} I_s.F(x)dx - FACII \\ \dots \\ FACI \int_0^{h_n} I_s.F(x)dx - FACII \end{bmatrix}$$

donde:

h_1, h_2, \dots, h_n Localización óptimo de capacitores

$I_{c1}, I_{c2}, \dots, I_{cn}$ Tamaño óptimo de capacitores

$FACI = (k_p + k_e.T.FC) / (k_p + T.k_e)$

$FACII = k_c / 2.r.(k_p + T.k_e)$

Tamaño óptimo de capacitores conmutables

$$\begin{bmatrix} h_1 & h_2 & \dots & h_n \\ h_2 & h_2 & \dots & h_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_n & h_n & \dots & h_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c1}' \\ I_{c2}' \\ \dots \\ I_{cn}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_0^{h_1} I_s.F(x)dx - FACII \\ \int_0^{h_2} I_s.F(x)dx - FACII \\ \dots \\ \int_0^{h_n} I_s.F(x)dx - FACII \end{bmatrix}$$

donde:

h_1, h_2, \dots, h_n	Localización óptimo de capacitores
$I_{c1}^*, I_{c2}^*, \dots, I_{cn}^*$	Tamaño óptimo de capacitores
FACII	$k_c / 2.r. (k_p + k_e^*)$
k_e^*	$K_e.FP2.TS.8760 / T$

7.- Se considera como localización de los capacitores conmutables la calculada para los capacitores fijos, es decir se instalarán en el mismo punto de la red de capacitores fijos y conmutables.

8.- El programa de optimización (subrutina del programa CAP89) se ha elaborado considerando las siguientes premisas:

- Dos localizaciones de diferentes capacitores no podrán ser iguales debido que la matriz de localización [H] tendría determinante igual a cero.
- No se considera la barra de la subestación de transmisión para la instalación de los capacitores.
- Se ha demostrado que los valores iniciales de tamaño de capacitores deben de ser de igual magnitud para obtener una mas rápida convergencia.

9.- Debido a la simplicidad en la preparación de los datos y la facilidad en la formación y modificación de la matriz admitancia, se ha utilizado el método de Gauss Seidel Matriz Admitancia para la evaluación de flujo de carga.

Cabe indicar, que el método nodal empleando la matriz impedancia requiere de un tiempo extra para obtener la matriz impedancia por inversión y mayor memoria de almacenamiento.

10.- En el presente trabajo no se ha analizado la influencia del modelo estático de representación de la carga (potencia constante, corriente constante o impedancia constante), que en alguna medida tiene, en el mejoramiento del perfil de tensiones y la reducción de las pérdidas con la utilización de capacitores.

11.- Para el sistema de distribución analizado, conexión en delta con neutro aislado, se debe instalar los capacitores con conexión en delta, principalmente para evitar que por desbalance de carga los capacitores sean sometidos a tensiones superiores a las nominales.

BIBLIOGRAFIA

- 1 Electric Energy Systems Theory : an Introduction
Olle I. Elgerd 1970.
- 2 Técnicas Computacionales en Sistemas Eléctricos de
Potencia.
Gilberto Enriquez Harper 1986; LIMUSA
- 3 Análisis Moderno de Sistemas Eléctricos de Potencia
Enriquez Harper 1977 ; LIMUSA
- 4 Sistemas Eléctricos de Gran Potencia
R.M. Weedy 1978 ; REVERTE
- 5 Código Nacional de Electricidad Tomo IV
Sistemas de Distribución - 1978
- 6 Estudio de Factibilidad Sobre el Desarrollo de un
Programa de Administración de Carga y Conservación de
Energía en el Sistema Eléctrico de ELECTROLIMA.S.A.
S & Z Consultores Asociados - Electricite de France
International - Octubre 1986
7. Optimun Size and Location of Shunt Capacitors on
Distribution Feeders
J.V. Schmill
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems
Vol. PAS-84 Nro. 9 September 1965
- 8 Determination of Primary-Feeder Losses
Nelson E. Chang
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems
Vol. PAS-87 Nro. 12 December 1968
- 9 Localiting Shunt Capacitors on Primary Feeder for
Voltage Control and Loss Reduction
Nelson E. Chang
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems
Vol. PAS-88 Nro. 10, October 1969
- 10 Analytical Method of Capacitor Allocation on
Distribucion Primary Feeders
Y.G. Bae
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems
Vol. PAS-97 Nro. 4 July/Aug. 1978
- 11 Distribution Primary Feeder I R Losses
N.R. Shultz
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems

Vol.PAS-97 Nro.2 March/April 1978

- 12 Calculation of Energy Losses in Distribution System

D.I.H. Sun S.Abe R.Shoults M.Chen
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems
Vol.PAS-99 Nro.4 July/Aug. 1980

- 13 Optimum Placement of Fixed and Switched Capacitors on Primary Distribution Feeders

S.H.Lee J.J Graiger
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems
Vol.PAS-100 - Nro.1 January 1981

- 14 Metodo for Reducing Losses in Distribution Feeders Shunt Capacitors and Conductor

ELECTRICAL POWER AND ENERGY SYSTEMS
Vol.3 Nro.4 October 1981

- 15 Performance Analysis of a Variable Source of Reactive Power on Distribution System Primary Feeders

IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems
Vol.PAS-100, Nro.11 November 1981

- 16 Multiple Variable Sources of Reactive Power on Distribution System Primary Feeders

K.Desai and D.Brown
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems
Vol.PAS-101 - Nro.12 December 1982

- 17 Optimum Size and Location of Shunt Capacitors for Reduction of Losses on Distribution Feeders.

J.J.Graiger S.H.Lee
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems
Vol.PAS-100 Nro.3 March 1981

- 18 Capacity Release by Shunt Capacitor Placement on Distribution Feeder : A New Voltage-Dependent Model

J.J.Graiger S.H.Lee
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems
Vol.PAS-101 Nro.5 May 1982

- 19 Estudio " Revision del BIL de los Equipos de Media Tension " - ELECTROLIMA 1985.

Ing.Orestes Castaneda P.

- 20 Normas CEI (Comisión Electrotécnica Internacional) Publicación 70-2 año 1955

Specification for capacitors for power systems.

- 21 Catálogos General Electric

Oil Switch - Nro.6203 -año 1985

Fusing of capacitor banks-Nro.6212

- 22 Catálogos Westinghouse Electrical Corporation
Stack Type Capacitor Equipments. año 1976
Wemcol Impregnated High Voltage Capacitor-1979

- 23 Catálogos McGraw Edison Company
Oil Switch - Nro.260 - año 1979
Pole-Mounted Rack-Nro.230- año 1978
Capacitor switching controls-Nro.230- año 1978