

86
2 ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

REGULACION DE TENSION EN
ALIMENTADORES AEREOS DE LA
CIUDAD DE MEXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A N

JEAN LEON ETERNOD

ENRIQUE MORALES LOPEZ

DIRECTOR DE TESIS

ING. FELIPE PEREZ FLORES

MEXICO, D. F.

1991

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

	pag.
I. Introducción y objetivos del trabajo	
I.1. Introducción	1
I.2. Objetivos del trabajo	2
II. Conceptos fundamentales de regulación de tensión	
II.1. Definiciones	3
II.1.1. Definiciones generales	3
II.1.2. Concepto de regulación de tensión	4
II.2. Cálculos fundamentales	6
II.2.1. Cálculo de la caída de tensión en una línea de alimentación	6
II.2.2. Cálculo de la regulación de tensión	9
II.2.3. Caída de tensión en un alimentador con carga uniformemente distribuida	9
II.2.4. Alimentadores con calibre escalonado	11
II.2.5. Caída de tensión por arranque de motores	13
II.3. Impacto de la regulación de tensión sobre los sistemas de distribución aéreos	15
III. Importancia de la regulación de tensión	
III.1. Causas y efectos de una regulación de tensión deficiente	19
III.2. Estado actual de la regulación de tensión en el área metropolitana.	29
IV. Análisis de los diferentes métodos de regulación	
IV.1. Reguladores de tensión	69
IV.1.1. Cambiador de derivaciones	70
IV.1.2. Regulador de pasos	73
IV.1.2.1. Principio de funcionamiento y tipos constructivos	73
IV.1.2.2. Tipos de conexión y posición del regulador con respecto al sistema	76
IV.1.2.3. Protección y medios de desconexión del regulador	78

IV.1.3. Control	80
IV.1.3.1. Principio de funcionamiento y tipos constructivos	80
IV.1.3.2. Compensación por caída de tensión en la línea	84
IV.1.4. Algunos parámetros de selección y ajuste de reguladores	86
IV.1.4.1. Selección y localización del regulador	86
IV.1.4.2. Ajuste del compensador por caída de línea	93
IV.2. Capacitores	
IV.2.1. Capacitores en serie	98
IV.2.1.1. Efecto de la instalación de capacitores en serie	98
IV.2.1.1.1. Sobrecompensación	100
IV.2.1.1.2. Circuitos con factor de potencia unitario o adelantado	101
IV.2.1.1.3. Resonancia	102
IV.2.1.2. Aplicaciones de capacitores en serie	103
IV.2.2 Capacitores en paralelo o derivación	104
IV.2.2.1. Efecto de la instalación de capacitores en paralelo	105
IV.2.2.1.1. Capacidad liberada en un alimentador	106
IV.2.2.1.2. Reducción de pérdidas	107
IV.2.2.1.3. Incremento de la tensión	108
IV.2.2.2. Tipos de instalación de capacitores en paralelo	110
IV.2.2.2.1. Bancos de capacitores fijos	110
IV.2.2.2.2. Bancos de capacitores desconectables	112
IV.2.2.2.2.1. Controles automáticos para capacitores desconectables	113

IV.2.2.3. Aplicaciones de capacitores en paralelo	117
IV.2.2.4. Localización de capacitores en paralelo	119
IV.2.2.5. Conexión de bancos de capacitores	126
IV.2.2.6. Bancos de capacitores en paralelo en subestaciones	126
IV.3. Incremento en el calibre del alimentador	127
IV.4. Incremento del nivel de tensión	128
IV.5. Transferencia de carga a otro alimentador	129
V. Ejemplos de aplicación	
V.1. Introducción	130
V.2. Definición del problema	130
V.3. Aplicación de reguladores	142
V.3.1. Aplicación de reguladores al alimentador CHA - 21	143
V.3.2. Aplicación de reguladores al alimentador CHA - 23	148
V.4. Aplicación de bancos de capacitores en paralelo	156
V.4.1 Aplicación de bancos de capacitores al alimentador CHA - 21	160
V.4.2 Aplicación de bancos de capacitores al alimentador CHA - 23	171
VI. Conclusiones y recomendaciones	181
VII. Bibliografía	184

I.- INTRODUCCION Y OBJETIVOS DEL TRABAJO

I.1 Introducción

El presente trabajo trata sobre los problemas de regulación de tensión en los sistemas de distribución aéreos y sus posibles soluciones.

Las empresas dedicadas al suministro de energía eléctrica deben proporcionar un servicio con la calidad requerida por los usuarios y cumpliendo con las leyes y normas establecidas. La calidad del servicio eléctrico se define como la capacidad del sistema para proporcionar un suministro aceptable dentro de límites previamente establecidos y las principales variables que la afectan son:

- Interrupciones
- Duración de las interrupciones
- Tensión
- Frecuencia
- Forma de onda

Las variables que comúnmente causan más problemas y con mayores consecuencias para los usuarios son las interrupciones y el nivel inadecuado de tensión. Siendo entonces el nivel de tensión una de las variables fundamentales para ofrecer una buena calidad de servicio se ve la necesidad de estudiar los métodos para mantenerlo dentro de límites adecuados.

Como se demuestra en los capítulos siguientes, existen soluciones aparentemente fáciles para tener un nivel adecuado de tensión, como son aumentar el calibre de los conductores o elevar la tensión del sistema, pero estas tienen características negativas como elevar considerablemente el costo del sistema o, en el caso de la elevación de tensión, resultar en niveles no seguros para sistemas tan cercanos a la

población. Es por esto que resulta importante analizar los diferentes métodos, sopesar las ventajas y desventajas de cada posible solución, así como conocer en todos los casos, los costos asociados.

Este trabajo está dividido en 7 capítulos tratando principalmente tres aspectos. En la primera parte se contemplan los conceptos básicos de regulación de tensión, la importancia de esta en los sistemas de distribución y el estado que guarda actualmente en el área metropolitana. En la segunda parte se analizan las posibles soluciones y en la tercera se proponen soluciones viables para mejorar la regulación de tensión.

1.2 Objetivos del trabajo

Los objetivos que se buscan son: investigar cuales son las técnicas que permiten mejorar la regulación de tensión, incluyendo tanto las soluciones actualmente aplicadas como los desarrollos más recientes; analizar cada uno de estos métodos y compararlos entre sí y finalmente proponer una solución para un alimentador real de Compañía de Luz y Fuerza del Centro que presente este tipo de problema.

II.- CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE REGULACION DE TENSION.

II.1 Definiciones

II.1.1 Definiciones generales.

Tensión nominal.- es el valor de tensión asignado a un aparato, circuito o sistema eléctrico que pertenece a una clase de tensión designada.

Tensión máxima.- es la tensión mas grande que se presente en un intervalo de tiempo definido.

Tensión mínima.- es la tensión mas pequeña que se presente en un intervalo de tiempo definido.

Tensión máxima permisible.- es el valor de tensión máximo al cual se puede operar el sistema.

Tensión mínima permisible.- es el valor de tensión mínimo al cual se puede operar el sistema.

Tensión máxima de operación.- es el valor de tensión máximo que se tiene en el primer consumidor del alimentador.

Tensión mínima de operación.- es el valor de tensión mínimo que se tiene en el último consumidor del alimentador.

Tensión de servicio .- es la tensión medida en las terminales de entrada del equipo de servicio del consumidor.

Tensión de utilización.- es la tensión medida en cualquier salida donde un aparato eléctrico pueda conectarse, o la tensión en las terminales de un equipo eléctrico.

Ancho de banda del sistema.- es la diferencia entre las tensiones máxima y mínima permisibles del sistema.

Ancho de banda de operación.- es la diferencia entre las tensiones máxima y mínima de operación.

Variación de tensión.- es la diferencia entre la tensión máxima y mínima en un punto específico de un alimentador del sistema de distribución.

Perfil de tensión.- es una representación gráfica del valor de la tensión a lo largo de un alimentador, desde las barras de la subestación hasta el último consumidor.

Caída de tensión.- es la diferencia de tensión entre el punto de envío y de recepción de la energía eléctrica.

La figura II.1 muestra el perfil de tensión típico de un alimentador residencial bajo condiciones de carga máxima y carga mínima.

II.1.2 Concepto de regulación de tensión.

El término regulación de tensión surge, en los sistemas de distribución de energía eléctrica, cuando las distancias entre el centro de suministro de energía y los consumidores alcanzan una longitud, tal que, la caída de tensión en la línea de alimentación se vuelve de una magnitud apreciable y afecta la tensión de servicio que debería recibir el consumidor. También, con frecuencia e independientemente de la longitud de la línea, cuando se alimentan zonas con una alta densidad de carga se presentan caídas de tensión apreciables, que afectan la tensión servicio a los usuarios.

Adicionalmente, la compañía suministradora de la energía eléctrica esta obligada a que la variación máxima de tensión que un consumidor tenga en su alimentación sea de +/-10% de la

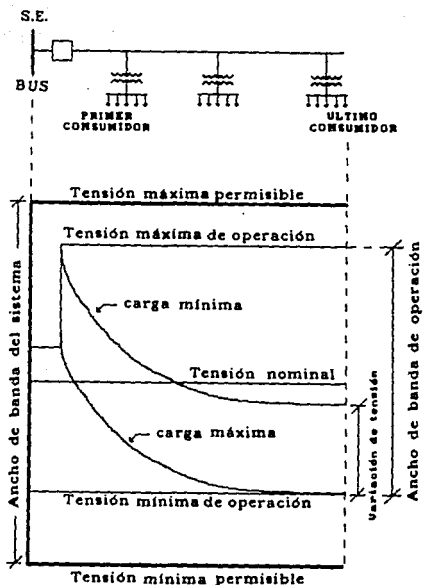


figura II.1

tensión nominal contratada, por lo que el concepto de regulación se vuelve imprescindible para cumplir con este compromiso.

En base a lo anterior se define a la regulación de tensión, en una línea de alimentación del sistema de distribución como: el cociente de la diferencia entre la tensión al inicio de la línea y la tensión en el extremo final de ésta, a plena carga, respecto a la tensión en el extremo final de la línea, a plena carga. Generalmente esta relación se

expresa en porciento, en la forma siguiente :

$$\% \text{ Regulación} = \frac{E_i - E}{E} \times 100 \quad \dots \quad \text{II.1}$$

donde:

E_i - Tensión al inicio de la línea

E - Tensión al final de la línea a plena carga

II.2 Calculos fundamentales.

II.2.1 Cálculo de caída de tensión en una línea de alimentación.

Caída de tensión en una línea de alimentación es la diferencia entre la tensión en el punto inicial de la línea de alimentación y la tensión en el extremo final de ésta. Su cálculo nos permite tomar las medidas necesarias para garantizar que todos los consumidores conectados a un alimentador reciban la tensión mínima requerida para el correcto funcionamiento de sus aparatos. Observando el diagrama eléctrico simplificado de una línea de distribución aérea, con una carga concentrada al final de la línea, la caída de tensión estará dada por :

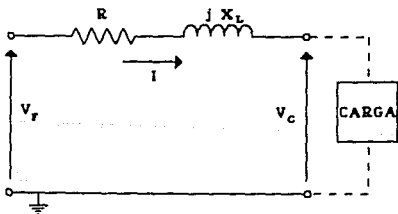


figura II.2

$$\Delta V_r = (R + jXL) \times I (\cos\theta + j\text{sen}\theta) \quad \dots \quad \text{II.2}$$

donde:

- ΔV_r - Caída de tensión total en la línea
- R - Resistencia total por fase de la línea
- XL - Reactancia total por fase de la línea
- $\cos\theta$ - factor de potencia

Una característica muy común en un alimentador de distribución es que su carga sea predominantemente inductiva, por lo tanto, su factor de potencia será atrasado. Si tomamos en cuenta esta característica en la ecuación II.2 y la desarrollamos tendremos lo siguiente :

$$\begin{aligned} \Delta V_r &= (R + jX) \times I (\cos\theta - j\text{sen}\theta) \\ \Delta V_r &= I (R\cos\theta - jR\text{sen}\theta + jX\cos\theta + X\text{sen}\theta) \quad \dots \quad \text{II.3} \end{aligned}$$

El cálculo de la ecuación (II.3) nos da el valor exacto de la caída tensión en la línea. En la práctica se ha observado que los términos imaginarios de la ecuación anterior son aproximadamente iguales en magnitud y de signo contrario, por lo que simplificando la expresión II.3 obtendremos una ecuación que nos expresa a la caída de tensión como la suma de caídas reales en la resistencia y reactancia de la línea. A la ecuación resultante, II.4, se le conoce como: concepto de impedancia.

$$\Delta V_r = I (R\cos\theta + X\text{sen}\theta) \quad \dots \quad \text{II.4}$$

El error que se comete al utilizar esta última expresión se muestra en el diagrama vectorial de la figura II.3.

Se puede ver en la figura II.3 que si el ángulo entre V_r y V_c es grande entonces el error aumenta, por lo que se debe tener cuidado con la aplicación de este concepto.

En los sistemas de distribución, en general, se encuentran conectados más de un consumidor por alimentador, lo que

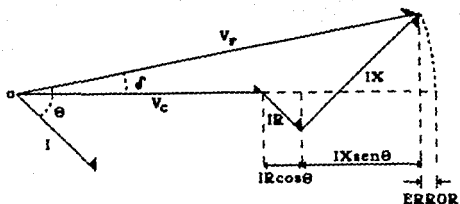


figura II.3

donde:

V_r - Tensión en el extremo inicial de la línea

V_c - Tensión en el extremo final de la línea

I - Corriente demandada por la carga

θ - Angulo del factor de potencia

δ - Angulo entre las tensiones inicial y final de la línea

IR - Caída debida a la resistencia de la línea

IX - Caída debida a la reactancia de la línea

dificulta un poco más el cálculo de caída de tensión. Para este efecto consideremos un alimentador de sección constante con las cargas mostradas en la figura II.4 :

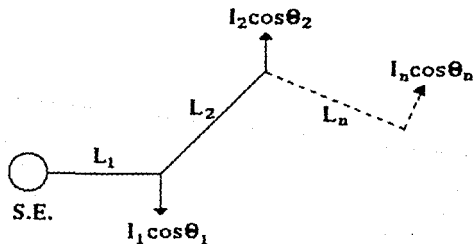


Figura II.4

La caída de tensión estará dada por :

$$V_r = (R + jX) L_1 I_1 (\cos \theta_1 + j \text{sen} \theta_1) + (R + jX) (L_1 + L_2) I_2 (\cos \theta_2 + j \text{sen} \theta_2) + \dots \\ \dots + (R + jX) (L_1 + L_2 + \dots + L_n) I_n (\cos \theta_n + j \text{sen} \theta_n) \quad \dots \quad 11.5$$

donde:

R - Resistencia por fase en Ω /unidad de longitud

X - Reactancia por fase en Ω /unidad de longitud

I_n - Corriente demandada por la carga n

$\cos \theta$ - Factor de potencia

L_n - Longitud del tramo n de alimentador

II.2.2 Cálculo de la regulación de tensión.

Como ya se vió anteriormente, cuando expresamos la caída de tensión como un porcentaje de la caída total en la línea con respecto a la tensión aplicada en la carga tenemos el concepto de regulación de tensión que matemáticamente expresado es :

$$\% \text{ Regulación} = \frac{V_r}{V_r} \times 100 \quad \dots \quad 11.6$$

donde:

V_r - Caída de tensión total en la línea

V_r - Tensión recibida en la carga

II.2.3 Caída de tensión en un alimentador con carga uniformemente distribuida.

En un sistema de distribución tener cargas con características similares, conectadas equidistantemente en una línea de alimentación, es un modelo que se adopta con cierta frecuencia. Esta característica, aplicable a algunos alimentadores, permite realizar simplificaciones en el cálculo de la regulación de tensión. Supongamos una línea de alimentación de longitud L, con una carga uniformemente distribuida, con una impedancia Z por unidad de longitud, y

una corriente demandada i por unidad de longitud, como se muestra en la figura:

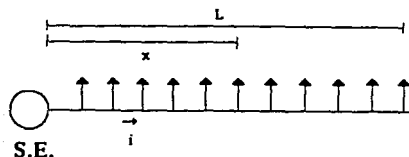


Figura 11.5

La caída de tensión a una distancia x del punto de alimentación será igual a la sumatoria de momentos eléctricos de las corrientes hasta el punto x , mas el momento eléctrico de todas las corrientes que estén después de el punto x , como si actuasen en el punto x . La ecuación para la caída de tensión queda en la forma siguiente :

$$\begin{aligned} \Delta V_x &= \int_0^x Z i x dx + i(L-x)Zx \\ &= \frac{Z i x^2}{2} \Big|_0^x + iLZx - i x^2 Z \\ &= \frac{Z i x^2}{2} + iLZx - i x^2 Z \\ \Delta V_x &= iLZx - \frac{Z i x^2}{2} \quad \dots \quad 11.7 \end{aligned}$$

Para la longitud total de la línea $x = L$, por lo tanto la caída total en el alimentador será :

$$\begin{aligned} \Delta V_T &= iLZL - \frac{Z i L^2}{2} \\ \Delta V_T &= \frac{Z i L^2}{2} \quad \dots \quad 11.8 \end{aligned}$$

Expresando la ecuación anterior en función de la impedancia total, $Z_L = Z_T$, y de la corriente total, $i_L = I$, tenemos :

$$\Delta V_T = \frac{Z_T I}{2} \dots\dots II.9$$

De donde se puede observar que para este tipo de alimentadores se debe considerar que la carga se encuentra concentrada en el punto medio de la línea.

II.2.4 Alimentadores con calibre escalonado.

Los alimentadores con calibre escalonado se utilizan en estructuras de operación radial sin interconexión a otros alimentadores, donde la reducción de la corriente que circula por la línea conforme avanzamos hacia el extremo final de ésta permite disminuir el calibre del conductor y a la vez el costo del alimentador. Debido a esto es importante encontrar la relación más favorable entre el área de la sección transversal del conductor y la caída de tensión en la línea. El siguiente cálculo tiene la finalidad de visualizar esta relación. Para fines de simplificación se considera el alimentador de la figura II.6, de corriente directa, de sección distinta en los tramos 1-2, 2-3, y con las cargas mostradas :

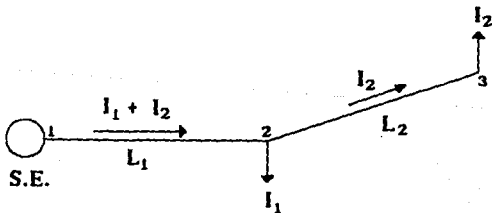


Figura II.6

La resistencia de cada sección de línea es :

$$R_{1-2} = \frac{2\rho L_1}{a_1} \quad \dots \quad \text{II.10} \qquad R_{2-3} = \frac{2\rho L_2}{a_2} \quad \dots \quad \text{II.11}$$

donde:

R - Resistencia óhmica

ρ - Resistividad volumétrica del material

L - Longitud del conductor

a - Area de la sección transversal del conductor

La caída de tensión en cada sección es :

$$V_{1-2} = R_{1-2} (I_1 + I_2)$$

$$V_{1-2} = \frac{2\rho L_1}{a_1} (I_1 + I_2) \quad \dots \quad \text{II.12}$$

$$V_{2-3} = R_{2-3} (I_2)$$

$$V_{2-3} = \frac{2\rho L_2}{a_2} (I_2) \quad \dots \quad \text{II.13}$$

El volumen total de conductor utilizado será:

$$V_T = 2\rho(L_1 a_1 + L_2 a_2) \quad \dots \quad \text{II.14}$$

Despejando a_1 y a_2 de II.12 y II.13 y substituyendo en II.14, obtenemos la expresión II.15 que nos relaciona el área del conductor con la caída de tensión :

$$V_T = 4\rho \left[\frac{L_1(I_1 + I_2)^2}{V_{1-2}} + \frac{L_2(I_2)^2}{V_{2-3}} \right] \quad \dots \quad \text{II.15}$$

Derivando esta ecuación con respecto a la caída de tensión e igualando a cero obtenemos la relación óptima entre el área y la caída de tensión expresada en función de la corrientes que demandan las cargas; dando como resultado la siguiente

expresión :

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{I_1 + I_2}{I_2} \quad \dots \quad \text{II.16}$$

II.2.5 Caída de tensión por arranque de motores.

En un sistema de distribución el equipo eléctrico del consumidor puede llegar a afectar el correcto funcionamiento del sistema. Este es el caso de las variaciones de tensión momentáneas debidas al arranque de motores de gran capacidad, que como sabemos demandan una corriente de arranque muy grande durante esta etapa, provocando que la tensión se reduzca de manera significativa. La utilización del siguiente método permite calcular la caída de tensión provocada por el arranque de un motor trifásico.

Primero se debe determinar la corriente de arranque que esta dada por la expresión:

$$I_a = \frac{S_a}{\sqrt{3} \times V_{L-L}} \quad \dots \quad \text{II.17}$$

Luego se obtiene la impedancia del circuito en el arranque que es :

$$Z = \frac{V_{L-N}}{I_a \phi} \quad \dots \quad \text{II.18}$$

Por último la caída de tensión en el arranque es :

$$CT_a = \frac{(TB)(I_a)(Z)}{V_{L-N}} \quad [V] \quad \dots \quad \text{II.19}$$

donde:

CT_a - Caída de tensión en el arranque

TB - Tensión base a la que se refiere la caída

I_a - Corriente de arranque

- S_a - Potencia de arranque
- Z - Impedancia durante el arranque
- V_{L-N} - Tensión de línea a neutro
- V_{L-L} - Tensión entre líneas
- I_φ - Corriente disponible en el punto de instalación durante la falla trifásica

Para dar una idea más clara de la aplicación de este método se presenta el siguiente ejemplo :

Se tiene una estación de bombeo, alimentada por un transformador de distribución conexión delta - estrella, 300 kVA, 13.8 kV - 440 / 254 V y con impedancia de 3.5%. Los datos de placa del motor de la bomba son: Potencia de salida 120 CP, potencia de entrada 100 kW, 3 fases, tensión nominal 440 V, corriente a plena carga 148 A, potencia a rotor bloqueado 609 kVA, letra de código NEC F.

La corriente de arranque según la ecuación II.17 es :

$$I_a = \frac{609 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 440} = 800 \text{ A.}$$

Para obtener la impedancia del circuito durante el arranque es necesario primero conocer la corriente de corto-circuito disponible (I_{cc}). Considerando bus infinito la I_{cc} en por unidad es igual al inverso de la impedancia en por unidad del transformador, por lo que:

$$I_{cc} = \frac{1}{0.035} = 28.6 \text{ p.u.}$$

y para las bases de 300 kVA y .440 kV, la corriente de corto-circuito disponible es :

$$I_{cc} = 11,269 \text{ A.}$$

Entonces, la impedancia de arranque es :

$$Z = \frac{440}{\sqrt{3} \times 11,269} = 0.0225$$

Y por lo tanto, la caída de tensión en el instante de arranque, referida a 13.8 kV es :

$$CT = \frac{13,800 \times 800 \times 0.0225}{440 / \sqrt{3}} = 978 \text{ V}$$

lo que representa el 7 % del valor de la tensión nominal del alimentador de 13.8 kV. Este porcentaje esta arriba de los valores permitidos, como se verá más adelante en el capítulo III, y en consecuencia afectará a otros consumidores del mismo alimentador.

II.3 Impacto de la regulación de tensión sobre los sistemas de distribución aéreos.

Un sistema de distribución aéreo se compone en su forma más simple de: una subestación de potencia, líneas de distribución primaria, transformadores de distribución, y líneas de distribución secundaria; estos tres últimos elementos van soportados en postes. La figura II.7 muestra la topología básica de una red de distribución.

Las líneas primarias están compuestas por dos elementos: el principal o troncal y los laterales o ramales. El principal es el tramo de alimentador que lleva la energía de la subestación de potencia a los laterales y los laterales son las líneas que se conectan al principal y llevan la energía hasta los transformadores de distribución.

En la planeación de una red de distribución se deben tener en cuenta muchos parámetros. Algunos de ellos son: Tipo de carga que alimentará la red, densidad de carga en la zona, porcentaje de caída de tensión permitido y tensión entre líneas

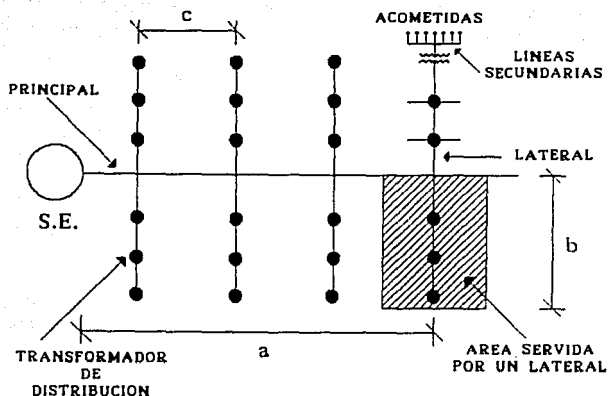


figura II.7

para la red; así como, limitaciones de tipo mecánico, térmico y económico. Las relaciones entre estos parámetros determinarán, para una forma geométrica específica de la red, el área de la zona de influencia de un alimentador.

Debido a que no es posible obtener una expresión general para cada una de las relaciones entre los distintos parámetros involucrados, que sea independiente de la forma geométrica de la zona de influencia del alimentador, dichas relaciones se deben obtener para las características particulares de la red que se esté diseñando. Por ejemplo, para el circuito de la figura II.7 la expresión que nos relaciona el % de caída de tensión total en el principal y sus laterales con los otros parámetros de la red, basándose en un modelo rectangular, es la siguiente :

$$\% \text{ CTr} = \frac{0.1DZ_1}{E^2} a^2 b + \frac{0.173cDZ_2}{E^2} b^2 \quad \dots \quad \text{II.20}$$

donde:

% CTr - Porcentaje de caída de tensión total para el principal y sus laterales

D - Densidad de carga en kVA/km²

a - longitud del principal en km

b - longitud del lateral en km

c - longitud del espaciamento entre laterales en km

E - Tensión nominal de la red en V

Z₁ - Impedancia del principal por km

Z₂ - Impedancia del lateral por km

En esta ecuación el primer término corresponde al porcentaje de regulación en el principal y el segundo al porcentaje de regulación en el lateral. También se ve que, para mantener un nivel de regulación de tensión requerido se puede variar uno o mas de los parámetros involucrados hasta obtener un resultado satisfactorio.

En general, para cualquier forma geométrica de la zona de influencia de un alimentador, el valor de regulación de tensión permitido para una línea de alimentación primaria, afecta la longitud de el principal, laterales y distancias entre laterales.

Además, el valor de regulación permitido afecta el área de la sección transversal del conductor que, como ya se ejemplificó en la sección II.2.4, se determina en base a los cálculos de capacidad de corriente y caída de tensión, siendo este último cálculo el que frecuentemente obliga a aumentar el área de la sección transversal del conductor y por ende aumenta el costo del alimentador.

También, por efectos de la regulación de tensión muchas veces es necesario aumentar la tensión de la red para que la

regulación se mantenga dentro de un límite tolerable. En la ecuación II.17 se ve que, si la tensión aumenta, el porcentaje de regulación de tensión disminuye; pero tiene el inconveniente de elevar los costos del equipo para la red en una proporción importante ya que todos los aislamientos se deben ajustar al nuevo valor de tensión.

III.- IMPORTANCIA DE LA REGULACION DE TENSION

III.1 Causas y efectos de una regulación de tensión deficiente.

Existen varias causas que pueden coadyuvar para tener una regulación deficiente, pero como se demostrará más adelante casi todas se derivan de una inadecuada planeación del sistema o del alimentador y/o de la carencia de recursos que obliga a diseñar sistemas austeros o restringidos y de menor calidad.

Como se comprobó en el capítulo II, una alta impedancia en el conductor causa una caída de tensión mayor. Si el calibre del conductor no es adecuadamente seleccionado, este tendrá una impedancia inadecuada y causará una caída de tensión superior a la máxima permitida. Otra forma de tener impedancia inadecuada es un alimentador demasiado largo; causa frecuente de una regulación deficiente en alimentadores rurales. Si la configuración del sistema no es bien planeada, puede dar como resultado alimentadores demasiado largos y problemas de regulación. Puede ocurrir también que la necesidad apremiante de electrificar zonas de muy rápido crecimiento, como son los asentamientos irregulares alrededor de la Ciudad de México, obligue a diseñar alimentadores aéreos radiales de gran longitud, con las consecuencias arriba mencionadas.

La carga excesiva también es motivo de incremento en la caída de tensión. Se puede tener carga excesiva por la mala estimación del factor de demanda y de la carga que se va a alimentar, por una mala estimación del crecimiento de la carga, o por crecimientos inesperados de la carga, por ejemplo, el establecimiento de talleres con cargas de fuerza en zonas supuestamente residenciales. Transformadores de distribución mal localizados, muy lejos de los centros de carga, o número menor de transformadores que el necesario para alimentar determinada zona pueden ser causas de una regulación

deficiente, ya que habrá transformadores sobrecargados y/o alimentadores más largos de lo necesario.

El bajo factor de potencia provoca que para la misma carga se requiera mayor corriente y por lo tanto se da una mayor caída de tensión. Esto último puede ocurrir en zonas con muchas cargas de fuerza. Este tipo de zonas causan otro problema que llega a ser grave en algunos lugares. Al producirse el arranque de motores, estos demandan una corriente de arranque de hasta 7 veces la corriente nominal. Si el motor es de gran capacidad, esta demanda súbita de potencia puede causar caída y oscilación momentánea de la tensión, con las consecuencias que se verán más adelante.

Los efectos negativos que provoca la regulación deficiente de tensión se pueden clasificar según los distintos tipos de equipos utilizados por los usuarios.

En lámparas de cualquier tipo una baja tensión provoca una iluminación deficiente (menor número de lúmenes emitidos), una disminución del consumo de energía ya que $P=V^2/R$ y, debido a que la eficiencia de la lámpara no tiene un comportamiento lineal con respecto a la tensión, una pérdida notable de eficiencia (lúmenes / watt). Por otra parte una tensión mayor a la nominal provoca una mayor disipación de energía que la considerada en el diseño de la lámpara, disminuyendo considerablemente su vida útil. Además una caída momentánea o una oscilación de la tensión provocará parpadeo.

Las lámparas incandescentes son las que sufren en mayor medida los efectos de la regulación deficiente, como se muestra en la figura III.1. Una disminución del 10% de la tensión en este tipo de lámpara resulta en disminuciones del 30% en el nivel de iluminación y del 20% en la eficiencia. En caso de tensión mayor a la nominal las lámparas incandescentes son seriamente afectadas, ya que una tensión permanentemente arriba de la nominal en un 10% reduce la vida de la lámpara hasta en un 70%.

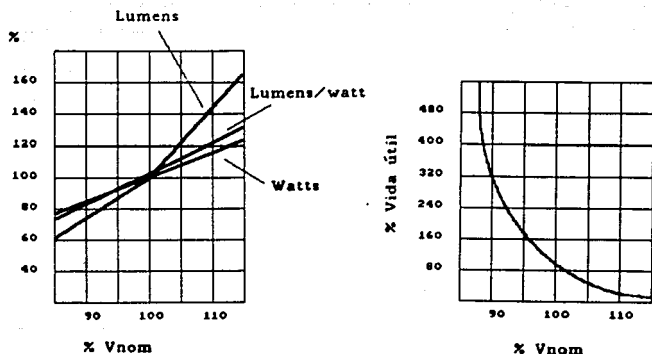


figura III.1

Las lámparas de mercurio son afectadas en los mismos parámetros que las lámparas incandescentes pero en menor medida (figura III.2) ya que una tensión 10% menor a la nominal provoca un nivel de iluminación menor en 20%. Además la construcción de estas lámparas es generalmente más robusta, ya que son utilizadas para uso industrial o alumbrado público y para incrementos de la tensión de suministro la disminución de la vida promedio es menor que en el caso anterior.

Para las lámparas fluorescentes el efecto sobre el nivel de iluminación y la eficiencia es menos notorio aún como se observa en la figura III.3, variando estos parámetros en forma casi directamente proporcional a la tensión, es decir, una reducción de 1% en el tensión, provoca un reducción de 1% en el nivel de iluminación y en la eficiencia. Sin embargo otros factores deben ser tomados en cuenta en estas lámparas, ya que utilizan balastros para su encendido. Una baja tensión provoca que el encendido sea deficiente o no se produzca. Una tensión superior a la nominal provoca mayor circulación de corriente en

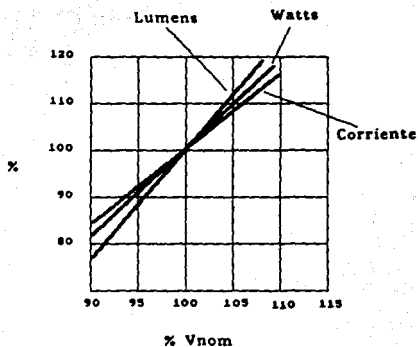


figura III.2

la balastro durante el encendido y por lo tanto sobrecalentamiento, acortando la vida útil de esta.

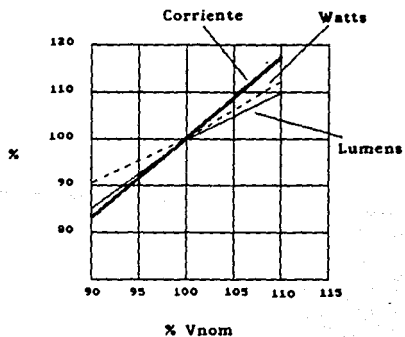


fig. III.3

En hornos y calentadores eléctricos, ya sean domésticos como secadoras, tostadores, planchas, etc., o industriales de todo tipo, el calor (energía) emitido por la resistencia de calentamiento es proporcional al cuadrado de la tensión. Por esta razón una variación en la tensión del 10% produce una variación en la potencia de 20% aproximadamente. Por otra parte el tiempo que tarda el dispositivo en alcanzar su temperatura de operación varía en la misma proporción. Estas dos características son de poca importancia en dispositivos domésticos, pero existen muchos procesos industriales que requieren precisión tanto en el tiempo de calentamiento como en la potencia producida y por lo tanto son seriamente afectados. También la vida útil de este tipo de aparatos se ve reducida por condiciones de alta tensión, ya que el calor que necesitan disipar en esta condición es mayor, llegando a durar el 50% o menos de la vida promedio.

Los efectos de la regulación deficiente en todo tipo de motores también son muy notorios. El efecto más dañino sobre la máquina es el provocado por condiciones de baja tensión, ya que si la carga se mantiene constante y la tensión baja el motor demanda más corriente, provocando a su vez un mayor calentamiento. Este sobrecalentamiento afecta los aislamientos y acorta la vida del motor. Otro efecto negativo de la baja tensión es reducir tanto el par máximo del motor, como el par de arranque. Para una disminución de 10% en la tensión se da una disminución de 20% en el par de arranque. Si la carga que mueve el motor tiene una gran inercia el tiempo en que el motor alcanza su velocidad nominal se incrementa o puede darse el caso de que el motor no puede vencer la inercia y no se mueva. En cualquiera de los dos casos la corriente de arranque se mantiene por más tiempo que el de diseño, dañando aislamientos y conductores o causando el disparo de las protecciones contra sobrecarga.

La condición de tensión superior a la nominal tiene el efecto contrario sobre el par de arranque, es decir, lo incrementa en un 20% para una sobretensión de 10%, causando un

esfuerzo mecánico mayor que el esperado en los coples que unen las flechas de los motores con las cargas, lo que puede provocar daños mecánicos. Por otra parte la corriente de arranque aumenta cuando aumenta la tensión, propiciado principalmente dos problemas. El primero es que esta corriente muy alta puede causar oscilación momentánea de la tensión. El segundo es que en casos extremos se pueden llegar a activar las protecciones contra sobrecorriente, que están calculadas para la corriente de arranque nominal.

Por último, el factor de potencia del motor se decrementa para una tensión superior a la nominal y se incrementa para una tensión inferior, pero en forma poco significativa. También la eficiencia del motor se mantiene prácticamente inalterable para pequeños cambios de tensión. La velocidad del motor no sufre más que muy pequeñas variaciones por problemas de regulación, que no afectan la mayoría de los procesos.

Los equipos electrónicos son afectados también por la regulación de tensión, a pesar de que la mayoría cuentan con reguladores propios. Las pantallas de televisión y monitores de computadoras presentan imágenes defectuosas. Una sobretensión permanente disminuye la vida de los componentes del regulador propio del aparato, si este existe, o de todos los componentes si no hay regulador. Una baja tensión puede hacer que un equipo digital no funcione, ya que si el convertidor AC/DC que lo alimenta no tiene a su entrada una tensión mínima requerida, el regulador no proporciona la salida normal (generalmente 5 o 15 V) sino una salida cercana a cero. Sin embargo, el principal daño a equipo electrónico generalmente no se da por estados de alta o baja tensión permanente, sino por oscilaciones en el sistema, picos de tensión o pérdida repentina de la tensión. Una sobretensión momentánea, provocada quizás por una salida brusca de la carga, puede causar severos daños o la destrucción de los componentes electrónicos, de pequeño tamaño e incapaces de disipar rápidamente el calor. En lugares con variaciones bruscas de tensión es común que equipos, principalmente de computación y video sean seriamente afectados. Una condición de

baja tensión momentánea, generalmente causada por arranque de motores de gran tamaño en algún lugar cercano, puede causar el efecto descrito anteriormente de salida cercana a cero en el convertidor AC/DC, y por lo tanto la interrupción de los procesos que se estén llevando a cabo en un equipo de cómputo o la alteración de la información que se está manejando, siendo en este caso menos importante el daño al equipo que la pérdida de tiempo o de información.

Como se ha demostrado es imposible mantener una magnitud de tensión exacta y constante en cada punto de utilización y por otra parte la regulación de tensión afecta el desempeño y la vida útil de la mayoría de los equipos. Por estos motivos es deseable encontrar valores de regulación que sean factibles de proporcionar por la compañía suministradora, tomando en cuenta consideraciones tanto técnicas como económicas, y que sean soportables satisfactoriamente por los equipos de los usuarios. Estos valores deben ser evaluados cuantitativamente y de común acuerdo entre los fabricantes de equipo y las compañías suministradoras y aparecer dentro de las reglamentaciones correspondientes.

Para estimar teóricamente que tan adecuada es la regulación de tensión se han establecido 3 zonas. La zona favorable o de preferencia, que incluye las tensiones nominales o de placa de todos los equipos y una tolerancia que varía entre 8 y 10% para tensiones menores a la nominal y entre 1 y 5% para tensiones superiores a la nominal, dependiendo de la tensión nominal del sistema y el tipo de carga (industrial, doméstica o comercial). Los equipos deben ser diseñados para operar en forma adecuada y eficiente dentro de esta zona y la compañía debe tratar de llegar a estos valores en la mayoría de sus circuitos de alimentación.

La zona tolerable que admite una tensión mínima 12% menor que la nominal y una tensión máxima 6% mayor que la nominal. Con tensiones dentro de esta zona los aparatos deben trabajar

satisfactoriamente en la mayoría de las aplicaciones, pero sin cumplir con todas las características de duración y eficiencia que garantiza el fabricante. Tensiones dentro de esta zona deben ser consideradas como de operación normal y no completamente indeseables, aunque si para algún uso particular el usuario tiene problemas, la tensión debe ser corregida.

La zona extrema o de emergencia no tiene límites bien definidos, pero se puede estimar en 2 o 3% por arriba y por debajo de la zona tolerable. Dentro de esta zona los aparatos no funcionarán con sus características estándar, aunque en la mayoría de los casos seguirán funcionando. Tensiones en esta zona deben ser permitidos únicamente durante periodos cortos de tiempo, reparaciones o uso temporal de rutas alternas de alimentación. Tensiones más allá de la zona extrema no deben ser permitidos bajo ninguna circunstancia y si se presentan deben de ser corregidos en el menor tiempo posible.

Todos los porcentajes mencionados para estas zonas están referidos al punto de utilización del equipo y no a la acometida, es decir, incluyen la caída de 5% permitida por las normas a la instalación del usuario y por lo tanto un 5% debe ser restado a los límites inferiores de las zonas para obtener las tensiones mínimas permitidas en las acometidas. La figura III.4 ilustra las zonas o rangos de regulación mencionados.

Dentro de los contratos y reglamentos nacionales se contempla que las compañías suministradoras deben mantener la tensión en la acometida del usuario dentro de un $\pm 10\%$ de la tensión contratada, lo que sumado al 5% de caída máxima en la instalación del usuario da como resultado un 15% máximo en el punto de utilización del equipo, cayendo dentro de los límites de la zona extrema, por lo que es deseable que fuera aun menor.

Con respecto a la forma en que se debe repartir esta caída entre alimentador primario, transformador de distribución, alimentador secundario y acometida no existe una norma y la compañía suministradora debe decidir la forma de hacerlo. No se

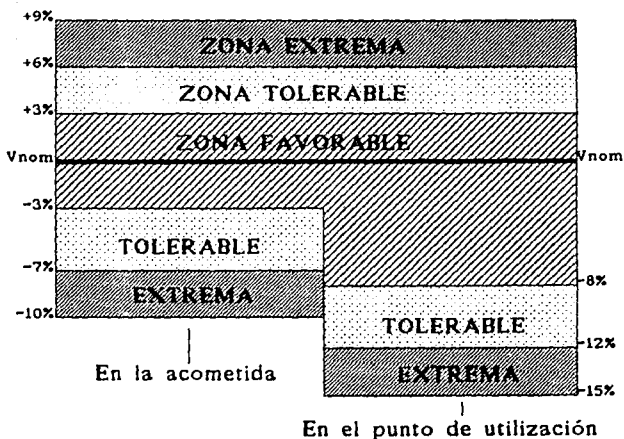


figura III.4

puede establecer una reglamentación estricta a este respecto debido a que las características particulares de los alimentadores, zonas de influencia y cargas son muy variables. Por ejemplo, se pueden tener muchos alimentadores en baja tensión con longitudes considerables. En este caso la caída en baja tensión será grande y se deberá tener una caída pequeña en el alimentador primario, digamos de un 2%. Sin embargo se puede tener un alimentador que solamente tenga cargas industriales alimentadas en mediana tensión, en cuyo caso podemos permitir una caída de 8% (zona tolerable) en el alimentador primario. Sin embargo, se puede establecer una sugerencia para alimentadores típicos con servicios en baja tensión en base a la experiencia de cada compañía suministradora. Esto será válido si las zonas de influencia de sus alimentadores en baja tensión no exceden en general ciertos límites, lo que hará que la caída máxima en baja tensión sea conocida y permita

establecer la sugerencia para caída máxima en el alimentador primario.

El perfil de tensión de un alimentador típico de la zona metropolitana con servicios en baja tensión se muestra a continuación y servirá de base en este trabajo como recomendación para establecer la caída que se debe permitir en los alimentadores de mediana tensión.

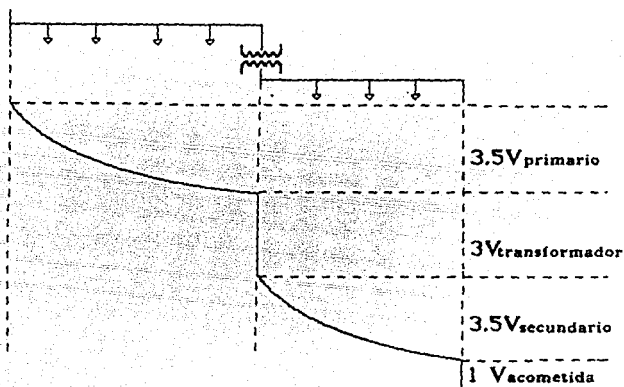


figura III.5

Todos los valores en el perfil anterior están en base de 127 V., lo que permite usarlo para alimentadores primarios de cualquier tensión haciendo las conversiones correspondientes. Se sugiere entonces una caída de 3.5 V en el alimentador primario, de 3 V en el transformador, de 3.5 V en baja tensión y de 1 V en la acometida, con una caída total de 11 V, es decir, 8.66%. A pesar de que este porcentaje pertenece aún a la zona extrema, si se sigue esta sugerencia como valores máximos permisibles, difícilmente se dará la condición de que todas las

caldas lleguen al valor máximo simultáneamente, de manera que en general se tendrán caldas dentro de la zona tolerable.

El fijar estos valores puede establecer límites útiles para planear y diseñar los sistemas de distribución, utilizando las relaciones descritas en el capítulo II, obligando a establecer áreas máximas de influencia limitadas por calda de tensión, así como establecer calibres y longitud de los alimentadores.

III.2 Estado actual de la regulación de tensión en el área metropolitana de la Ciudad de México

El área metropolitana tiene como característica principal una alta densidad de carga en la mayor parte de la gran superficie que ocupa. Esto provoca que exista un gran número de subestaciones y alimentadores generalmente cortos en los cuales las caldas no son considerables. Así mismo existen hacia la periferia asentamientos tanto regulares como irregulares de rápido crecimiento en zonas donde no hay un número suficiente de subestaciones y en donde se debe incrementar el suministro de energía eléctrica a un ritmo acelerado. Además estas zonas ya estaban abastecidas por alimentadores generalmente rurales a los cuales se han ido agregando cargas, de manera que los alimentadores de la periferia de la ciudad tienden a ser de mayor longitud y área de influencia, en donde es más probable que existan problemas de regulación.

Para analizar el estado actual de la regulación en el área antes descrita se tomó como primera aproximación la longitud de los alimentadores a partir de un listado en el que aparecen los nombres y subestaciones correspondientes de cada alimentador, su nivel de tensión y la longitud total en km del alimentador, incluyendo el troncal y los ramales. Se supuso que en general entre mayor fuera la longitud total del alimentador, mayor sería la calda de tensión. Es importante notar que la longitud

que interesa para calcular la máxima caída es la del troncal más la del último ramal, sin importar la longitud de los demás ramales. Se observó de los planos de los alimentadores que, a pesar de tener todas formas muy diferentes, la longitud del alimentador hasta el usuario más alejado no excede 1/3 de la longitud total del alimentador con todos sus ramales. Existen en la zona de estudio poco menos de 800 alimentadores, de los cuales aproximadamente 650 son alimentadores en 23 kV y el resto en otras tensiones, principalmente 6 y 13.8 kV. Los datos precisos no son muy significativos por que el sistema cambia constantemente, los alimentadores son redistribuidos, y se está efectuando paulatinamente el cambio de tensión a 23 kV en los alimentadores que aún no tienen esta tensión, sin embargo los datos obtenidos son lo suficientemente representativos. En esta parte del trabajo se analizaron únicamente los alimentadores de 23 kV.

Los alimentadores en 23 kV presentan la siguiente distribución según su longitud:

LONGITUD	ALIMENTADORES	%
L < 30 km	537	83.13
50 km > L > 30 km	75	11.60
100 km > L > 50 km	29	4.45
L > 100 km	5	0.77

De cada uno de estos grupos se tomó una muestra de 3 alimentadores para analizarlos en forma particular y determinar si existen en ellos problemas de regulación. Se tomó en cuenta para seleccionarlos que tuvieran un área de influencia grande (por inspección del plano general de zonas de influencia de alimentadores) y que pertenecieran a distintas subestaciones y zonas del área de estudio. Se consideró que alimentadores de menos de 30 km no tendrían problemas en base a los siguientes datos: La longitud del alimentador hasta el último usuario no excede los 10 km, la capacidad firme máxima de los alimentadores es de 12 MVA y el calibre más común en

alimentadores de 23 kV es ACSR 336. Si suponemos carga uniformemente distribuida podemos efectuar el cálculo de caída de tensión considerando la carga concentrada a la mitad del alimentador y aplicando el concepto de impedancia tenemos:

$$Z=0.198+j0.3844 \Omega/\text{km} \quad \text{y} \quad L=5 \text{ km}$$

$$Z=0.99+j1.922 \Omega$$

$$\text{F.P.}=0.85 \quad \theta=31.788^\circ \quad \text{sen}\theta=0.5267$$

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} = \frac{12000}{1.732 \times 23} = 301.23 \text{ Amp}$$

$$V=R\text{Icos}\theta+X\text{Isen}\theta$$

$$V=(0.99)(301.23)(0.85)+(1.922)(301.23)(0.5267)$$

$$V=588.47 \text{ V} = 2.56\%$$

$$V=3.25 \text{ V en base de } 127 \text{ V}$$

Esto significa que en las peores condiciones (carga máxima y en el punto más alejado del alimentador), se tendría una caída menor a 3.5 V en base de 127. El cálculo sirvió de base para suponer que alimentadores de más de 30 km podrían presentar problemas.

De los alimentadores de más de 100 km se seleccionó la información de dos, analizándose un total de 11 alimentadores:

ALIMENTADOR	SUBESTACION
LEC-21	Lechería
CJM-23	Cuajimalpa
CHA-21	Chalco
COA-28	Coapa
NET-27	Netzahualcoyotl
CRS-21	Contreras
IZT-28	Iztapalapa

ALIMENTADOR	SUBESTACION
RES-24	Los Reyes
MER-28	Merced
Huizachal	Naucalpan
ODB-29	Odon de Buen

A continuación se revisaron los planos de cada uno de los alimentadores, obteniéndose un modelo en el que aparecen las cargas instaladas (suma de los transformadores conectados a ese punto) y los tramos de alimentador entre las cargas. Para llegar a estos modelos se agruparon cargas cercanas entre sí (no más separadas que 5% de la longitud total del alimentador) y se midieron directamente del plano las distancias entre estas cargas o grupos de cargas, sin importar las longitudes de los ramales, ya que prácticamente no afectan el cálculo de la caída máxima de tensión. Este procedimiento se ilustra más adelante con los planos de los alimentadores CRS-21 y MER-28 y sus correspondientes modelos. Cuando existía duda respecto a el tramo en el que se produciría mayor caída se incluyeron las trayectorias posibles y se calcularon por separado.

Para realizar los cálculos de caída de tensión se desarrolló un programa de cómputo que realiza el cálculo según la fórmula descrita en el capítulo dos para un alimentador con múltiples cargas no uniformemente distribuidas.

El programa realiza las siguientes simplificaciones: toma en cuenta un factor de potencia igual para todas las cargas y supone un calibre del conductor uniforme y único para todos los alimentadores. A cada una de las cargas se le aplica un factor de utilización. El factor de utilización es el cociente de la carga máxima entre la carga instalada y nos permite calcular la caída con el valor de carga máxima real que se presenta y no con la carga instalada. En este caso la demanda máxima se obtuvo revisando los valores reales registrados para cada alimentador. El factor de potencia utilizado fue 0.85 y se

supuso conductor ACSR 336 por ser el más aplicado en troncales de 23 kV.

Estas simplificaciones provocan que el cálculo no sea muy exacto, pero cumple con la finalidad de proporcionar una aproximación que alerte sobre alimentadores con posibles problemas de regulación, utilizando los mínimos datos posibles. En el capítulo V se desarrolla un programa que realiza un cálculo más aproximado utilizando un mayor número de datos y que puede aplicarse cuando se desee analizar más detalladamente un alimentador.

En las siguientes páginas se muestran los modelos obtenidos para cada alimentador, el programa utilizado para el cálculo, y los resultados obtenidos.

**PLANOS DE LOS ALIMENTADORES CRS-21 Y MER-20
EN SOBRE ANEXO AL FINAL DEL TRABAJO**

PROGRAMA DE CALCULO

RUTINA DE LECTURA DE DATOS

```

5 dim l(50),s(50)
10 print"HM":print
20 input nombre y subestacion del alimentador"ln$:print
30 input demanda maxima ( amp )"jm:print
40 input numero de tramos"nt:print
50 for j=1 to nt
60 : print longitud del tramo "j:
70 : input l(j)
80 : print carga instalada "j:
90 : input s(j):print
100 next j
110 dopenHl,"@prueba",w
120 printHl,n$
130 printHl,im
140 printHl,nt
150 for j=1 to nt
160 : printHl,l(j)
170 : printHl,s(j)
180 next j
190 dcloseHl
200 end

```

CALCULO DE CAIDA DE TENSION

```

10 rem Calculo de caida de tension en alimentadores
20 rem
30 rem Este programa calcula la caida de tension en un alimentador
40 rem con multiples cargas, considerando el factor de potencia y
50 rem factor de utilizacion igual para todas las cargas.
60 rem
70 rem l(n) - longitud del tramo n del alimentador en metros
80 rem s(j) - carga trifasica instalada j en kva
90 rem i(j) - corriente de fase que demanda la carga s(j)
100 rem vr(j) - caida de tension en la resistencia debida a la
corriente j
110 rem vi(j) - caida de tension en la reactancia debida a la
corriente j
120 rem vt(j) - caida de tension total debida a la corriente j
130 rem ct - caida de tension total en el alimentador
140 rem nt - numero de tramos
150 rem fu - factor de utilizacion
160 rem im - corriente maxima medida en el alimentador
170 rem sm - carga maxima que demanda el alimentador
180 rem si - capacidad instalada ( suma de todos los
transformadores 23/220 )
190 rem
200 fp=0.85 : rem factor de potencia
210 rr=0.198 : rem resistencia del cable del alimentador en ohms/km

```



```

220 x=0.384 : rem reactancia del cable del alimentador en ohms/km
230 vn=23 : rem tension nominal del sistema en kv
240 rem
250 ap=atn(fp/sqr(-fp#fp+1))+
260 r=rr/1000
270 i1=x/1000
280 r2=cos(ap)
290 i2=sin(ap)
300 gosub 5000
310 r1=r
320 i1=i
330 l=0:cr=0:ci=0:si=0:lt=0
340 dim l(100),s(100),i(100),vr(100),vi(100),vt(100)
350 dopenhi,"PRUEBA"
360 inputhi,ne
365 inputhi,ie
370 inputhi,nt
380 for j=1 to nt
390 : inputhi,l(j):print
400 : print" longitud del tramo "j;" = "l(j)
410 : inputhi,s(j):print
420 : print" carga "j;" = "s(j)
430 next j
435 dclosehi
440 for j=1 to nt
450 : si=si+s(j)
455 : lt=lt+l(j)
460 next j
470 sm=sqr(3)*vn#im
480 fu=sm/si
490 for j=1 to nt
500 : i(j)=(s(j)#fu)/(1.732#vn)
510 next j
520 for j=1 to nt
530 : l=l+l(j)
540 : r2=i#i(j)
550 : i2=0
560 : gosub 5000
570 : vr(j)=r
580 : vi(j)=i
590 : vt(j)=sqr((vr(j)#2)+(vi(j)#2))
600 next j
610 for j=1 to nt
620 : cr=cr+vr(j)
630 : ci=ci+vi(j)
640 next j
650 ct=sqr((cr#2)+(ci#2)):print
655 pc=ct/230
657 cb=pc#127/100
660 for j=1 to nt
670 : print" caida "j;" "vt(j):print
680 next j
690 print" caida total del alimentador = "ct;" v.":print
700 input" imprimir resultados (s/n)";a$
710 if a$="s" then gosub 3000

```

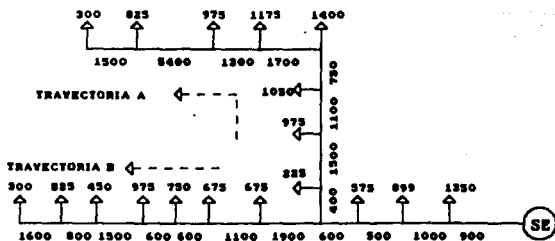
```

720 stop
3000 rem
3010 rem subrutina de impresion de resultados
3020 rem
3030 dopen#4,"salida",u4
3040 print#4,"      "jn#:print#4
3050 print#4,"      demanda maxima ="jij" asp."
3060 print#4,"      numero de tramos ="jnt
3070 print#4,"      factor de utilizacion ="jfu
3080 print#4,"      carga total instalada ="jisj" kva"
3090 print#4,"      longitud total del troncal ="jltj" m":print#4
3100 print#4,"      tramo longitud . carga instalada"
3110 print#4,"          (a)          (kva)"
3120 for j=1 to nt
3130 :   print#4,using"#####"j;
3140 :   print#4,using"#####"l(j);
3150 :   print#4,using"#####"s(j)
3160 next j
3170 print#4:print#4," #### caida total del alimentador ="
3175 print#4,using"###.###"ictl:print#4,"v"
3180 print#4:print#4,"          porcentaje de caida ="
3185 print#4,using"###.###"ipcj:print#4,"%"
3190 print#4:print#4,"          caida en base de 127 volts ="
3195 print#4,using"###.###"icbj:print#4,"v"
3200 dclose#4
3210 return
5000 rem
5010 rem subrutina de multiplicacion de numeros complejos
5020 rem
5030 m1=sqr((r1^2)+(i1^2))
5040 m2=sqr((r2^2)+(i2^2))
5050 a1=atn(i1/r1)
5060 a2=atn(i2/r2)
5070 m=m1*m2
5080 a=a1+a2
5090 r=m*cos(a)
5100 i=m*sin(a)
5110 return
5120 end

```

**MODELOS DE LOS ALIMENTADORES
Y RESULTADOS DEL PROGRAMA**

Subestación LECHERIA
Alimentador LEC-21 (Cuamatla)



LEC-21A Subestación Lechería

Demanda máxima = 380 Amp.
Número de tramos = 12
Factor de utilización = 1.05133163
Carga total instalada = 14399 kVA
Longitud total del troncal = 16450 m

Tramo	Longitud (m)	Carga Instalada (kVA)
1	900	1350
2	1000	899
3	500	575
4	600	4650
5	400	225
6	1300	975
7	1100	1050
8	750	1400
9	1700	1175
10	1300	975
11	5400	825
12	1500	300

**** Caída total del alimentador = 856.699V

Porcentaje de caída = 3.72%

Caída en base de 127 volts = 4.7305V

LEC-21B Subestación Lechería

Demanda máxima = 380 Amp.
Número de tramos = 11
Factor de utilización = 1.05133163
Carga total instalada = 14399 kVA
Longitud total del troncal = 11100 m

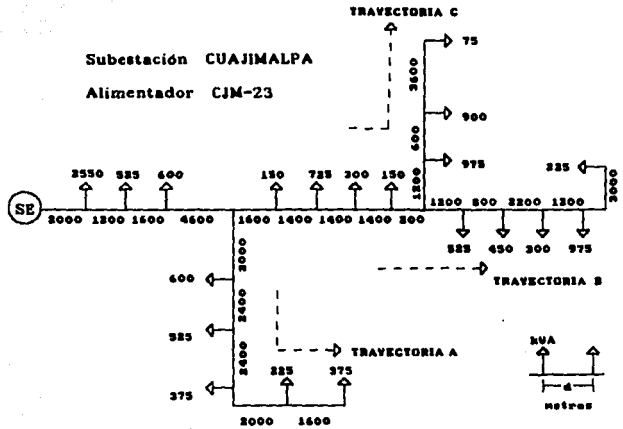
Tramo	Longitud (m)	Carga instalada (kVA)
1	900	1350
2	1000	899
3	500	575
4	600	6925
5	1900	675
6	1100	675
7	600	750
8	600	975
9	1500	450
10	800	825
11	1600	300

**** Caída total del alimentador = 678.297V

Porcentaje de caída = 2.95%

Caída en base de 127 volts = 3.7454V

Subestación CUAJIMALPA
Alimentador CJM-23



14

CJM-23A Subestación Cuajimalpa

Demanda máxima = 36 Amp.
Número de tramos = 9
Factor de utilización = .108646823
Carga total instalada = 13200 kVA
Longitud total del troncal = 19800 m

Tramo	Longitud (m)	Carga instalada (kVA)
1	2000	2550
2	1200	525
3	1600	600
4	4600	7425
5	2000	600
6	2400	525
7	2400	375
8	2000	225
9	1600	375

**** Calda total del alimentador = 130.954V

Porcentaje de calda = 0.57%

Calda en base de 127 volts = 0.7231V

CJM-23B Subestación Cuajimalpa

Demanda máxima = 36 Amp.
Número de tramos = 14
Factor de utilización = .114960967
Carga total instalada = 12475 kVA
Longitud total del troncal = 23800 m

Tramo	Longitud (m)	Carga instalada (kVA)
1	2000	2550
2	1200	525
3	1600	600
4	4600	2100
5	1600	150
6	1400	725
7	1400	300
8	1400	150
9	200	2900
10	1200	525
11	800	450
12	2200	300
13	1200	975
14	3000	225

**** Calda total del alimentador = 173.531V

Porcentaje de calda = 0.75%

Calda en base de 127 volts = 0.9582V

CJM-23C Subestación Cuajimalpa

Demanda máxima = 36 Amp.
Número de tramos = 12
Factor de utilización = .114940967
Carga total instalada = 12475 kVA
Longitud total del troncal = 20800 m

Tramo	Longitud (m)	Carga instalada (kVA)
1	2000	2550
2	1200	525
3	1600	600
4	4600	2100
5	1600	150
6	1400	725
7	1400	300
8	1400	150
9	200	3200
10	1200	1200
11	600	900
12	3600	75

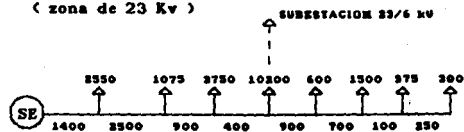
****# Caída total del alimentador = 165.452V

Porcentaje de caída = 0.72%

Caída en base de 127 volts = 0.9136V

Subestación CHALCO

Alimentador CHA-21
(zona de 23 Kv)



CHA-21 Subestación Chaico

Demanda máxima = 400 Amp.
Número de tramos = 8
Factor de utilización = .783040169
Carga total instalada = 20350 kVA
Longitud total del troncal = 7150 m

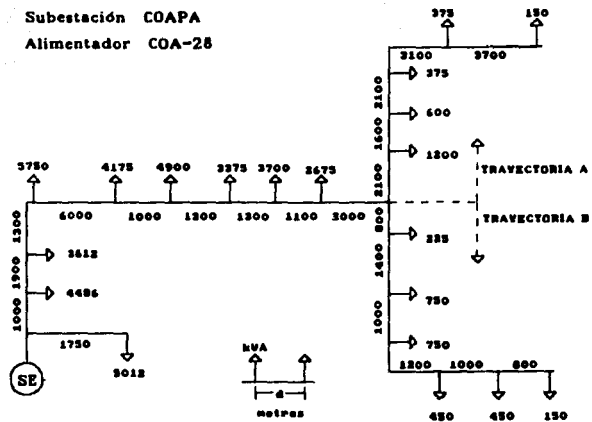
Tramo	Longitud (m)	Carga instalada (kVA)
1	1400	2550
2	2500	1075
3	900	3750
4	400	10200
5	900	600
6	700	1500
7	100	375
8	250	300

****# Caída total del alimentador = 827.124V

Porcentaje de caída = 3.60%

Caída en base de 127 volts = 4.5672V

Subestación COAPA
Alimentador COA-28



COA-28A Subestación Coapa

Demanda máxima = 438 Amp.
Número de tramos = 15
Factor de utilización = .404982705
Carga total instalada = 43085 kVA
Longitud total del troncal = 29600 m

Tramo	Longitud (m)	Carga instalada (kVA)
1	100	5012
2	1000	4486
3	1900	3612
4	1300	5750
5	6000	4175
6	1000	4900
7	1300	3375
8	1300	3700
9	1100	2675
10	2000	2700
11	2100	1200
12	1600	600
13	2100	375
14	3100	375
15	3700	150

**** Caída total del alimentador = 1657.597V

Porcentaje de caída = 7.21%

Caída en base de 127 volts = 9.1528V

CDA-288 Subestación Coapa

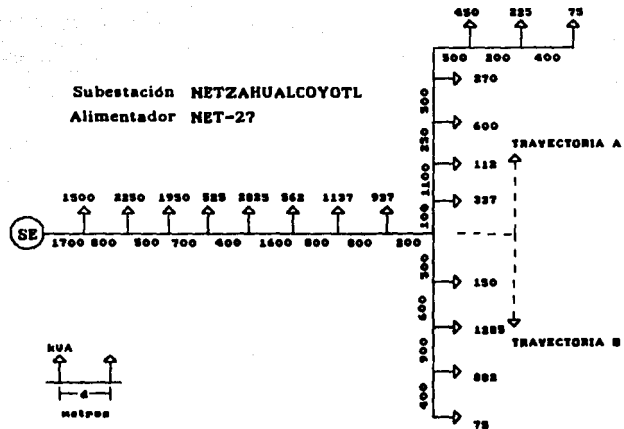
Demanda máxima = 438 Amp.
Número de tramos = 16
Factor de utilización = .404278958
Carga total instalada = 43160 kVA
Longitud total del troncal = 23200 m

Tramo	Longitud (m)	Carga instalada (kVA)
1	100	5012
2	1000	4486
3	1900	3612
4	1300	5750
5	6000	4175
6	1000	4900
7	1300	3375
8	1300	3700
9	1100	2675
10	2000	2700
11	800	225
12	1400	750
13	1000	750
14	1200	450
15	1000	450
16	800	150

**** Caída total del alimentador = 1649.027V

Porcentaje de caída = 7.17%

Caída en base de 127 volts = 9.1055V



NET-27A Subestación Netzahuaticoyotl

**Demanda máxima = 260 Amp.
Número de tramos = 16
Factor de utilización = .64146057
Carga total instalada = 16147 kVA
Longitud total del troncal = 10550 m**

Tramo	Longitud (m)	Carga instalada (kVA)
1	1700	1500
2	800	2250
3	500	1950
4	700	525
5	400	2825
6	1600	562
7	800	1137
8	800	937
9	200	2392
10	100	337
11	1100	112
12	250	600
13	500	270
14	500	450
15	200	225
16	400	75

******# Caída total del alimentador = 570.009V**

Porcentaje de caída = 2.48%

Caída en base de 127 volts = 3.1474V

NET-27B Subestación Netzahutlicoyotl

Demanda máxima = 260 Amp.
Número de tramos = 13
Factor de utilización = .64146057
Carga total instalada = 16147 kVA
Longitud total del troncal = 9900 m

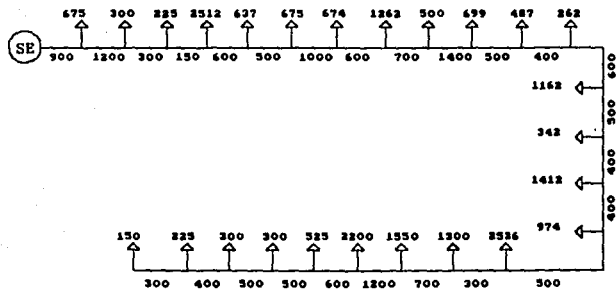
Tramo	Longitud (m)	Carga instalada (kVA)
1	1700	1500
2	800	2250
3	500	1950
4	700	525
5	400	2825
6	1600	562
7	800	1137
8	800	937
9	200	2069
10	500	150
11	600	1285
12	900	882
13	400	75

****** Calda total del alimentador = 569.595V**

Porcentaje de calda = 2.48%

Calda en base de 127 volts = 3.1452V

Subestación CONTRERAS
Alimentador CRS-21



CRS-21 Subestación Contreras

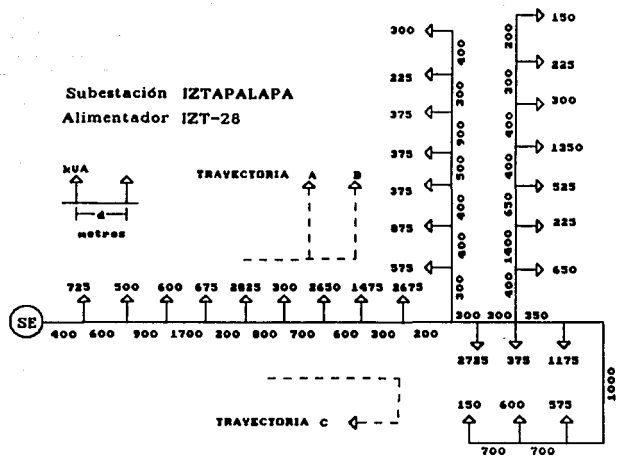
Demanda máxima = 204 Amp.
Número de tramos = 25
Factor de utilización = .371357265
Carga total instalada = 21884 kVA
Longitud total del troncal = 15150 m

Tramo	Longitud (m)	Carga instalada (kVA)
1	900	675
2	1200	300
3	300	225
4	150	2512
5	600	637
6	500	675
7	1000	674
8	600	1262
9	700	500
10	1400	699
11	500	487
12	400	262
13	600	1162
14	500	342
15	400	1412
16	400	974
17	500	2536
18	300	1300
19	700	1550
20	1200	2200
21	600	525
22	500	300
23	500	300
24	400	225
25	300	150

**** Calda total del alimentador = 734.669V

Porcentaje de calda = 3.19%

Calda en base de 127 volts = 4.0567V



IZT-28A Subestación Iztapalapa

Demanda máxima = 395 Amp.
Número de tramos = 17
Factor de utilización = .640964627
Carga total instalada = 24550 kVA
Longitud total del troncal = 9600 m

Tramo	Longitud (m)	Carga instalada (kVA)
1	400	725
2	600	500
3	900	600
4	1700	675
5	200	2825
6	800	300
7	700	2650
8	600	1475
9	300	2675
10	200	9025
11	300	575
12	400	875
13	400	375
14	500	375
15	900	375
16	300	225
17	400	300

****** Caída total del alimentador = 957.459V**

Porcentaje de caída = 4.16%

Caída en base de 127 volts = 5.2868V

IZT-28B Subestación Iztepalapa

Demanda máxima = 395 Amp.

Número de tramos = 19

Factor de utilización = .654290295

Carga total instalada = 24050 kVA

Longitud total del troncal = 10750 m

Tramo	Longitud (m)	Carga instalada (kVA)
1	400	725
2	600	500
3	900	600
4	1700	675
5	200	2825
6	800	300
7	700	2650
8	600	1475
9	300	2675
10	200	2600
11	300	2725
12	300	2875
13	400	650
14	1400	225
15	650	525
16	400	1350
17	400	300
18	300	225
19	200	150

******* Caída total del alimentador = 1014.318V**

Porcentaje de caída = 4.41%

Caída en base de 127 volts = 5.6008V

IZT-28C Subestación Iztapalapa

Demanda máxima = 395 Amp.
Número de tramos = 16
Factor de utilización = .664653921
Carga total instalada = 23675 kVA
Longitud total del troncal = 9750 m

Tramo	Longitud (m)	Carga instalada (kVA)
1	400	725
2	600	500
3	900	600
4	1700	675
5	200	2825
6	800	300
7	700	2650
8	600	1475
9	300	2675
10	200	2600
11	300	2725
12	300	3425
13	350	1175
14	1000	575
15	700	600
16	700	150

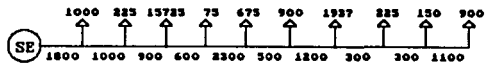
**** Calda total del alimentador = 973.221V

Porcentaje de calda = 4.23%

Calda en base de 127 volts = 5.3739V

Subestación LOS REYES
Alimentador RES-24

58



RES-24 Subestación Sta. Barbara.

Demanda máxima = 160 Amp.
Número de tramos = 10
Factor de utilización = .292222032
Carga total instalada = 21812 kVA
Longitud total del troncal = 10000 m

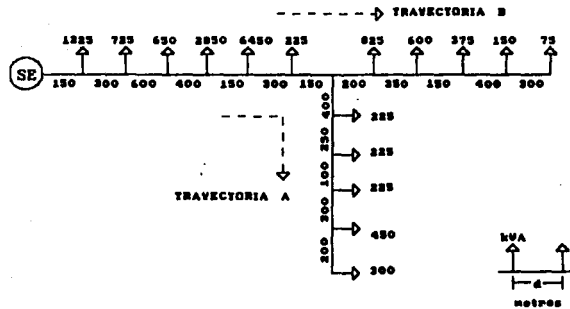
Tramo	Longitud (m)	Carga instalada (kVA)
1	1800	1000
2	1000	225
3	900	15725
4	600	75
5	2300	675
6	500	900
7	1200	1937
8	300	225
9	300	150
10	1100	900

**** Caida total del alimentador = 317.332V

Porcentaje de caída = 1.38%

Caida en base de 127 volts = 1.7522V

Subestación MERCED
Alimentador MER-26



MER-28A Subestación Merced

Demanda máxima = 207 Amp.
Número de tramos = 12
Factor de utilización = .526919738
Carga total instalada = 15650 kVA
Longitud total del troncal = 3300 m

Tramo	Longitud (m)	Carga instalada (kVA)
1	150	1225
2	300	725
3	600	650
4	400	2850
5	150	6450
6	300	225
7	150	2100
8	400	225
9	250	225
10	100	225
11	300	450
12	200	300

**** Caída total del alimentador = 140.303V

Porcentaje de caída = 0.61%

Caída en base de 127 volts = 0.7747V

MER-28B Subestación Merced

Demanda máxima = 207 Amp.
Número de tramos = 11
Factor de utilización = .526919738
Carga total instalada = 15650 kVA
Longitud total del troncal = 4200 m

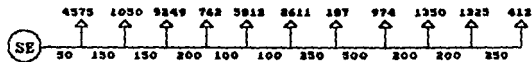
Tramo	Longitud (m)	Carga instalada (kVA)
1	150	1225
2	300	725
3	600	650
4	400	2850
5	150	6450
6	300	225
7	150	1425
8	200	825
9	350	600
10	700	150
11	900	525

**** Caída total del alimentador = 143.496V

Porcentaje de caída = 0.62%

Caída en base de 127 volts = 0.7923V

Subestación NAUCALPAN
Alimentador HUIZACHAL



52



HUIZACHAL Subestación Naucaipan

Demanda máxima = 390 Amp.
Número de tramos = 11
Factor de utilización = .548857023
Carga total instalada = 28307 kVA
Longitud total del troncal = 2150 m

Tramo	Longitud (m)	Carga instalada (kVA)
1	50	4575
2	150	1050
3	150	9249
4	200	762
5	100	5812
6	100	2611
7	250	187
8	500	974
9	200	1350
10	200	1325
11	250	412

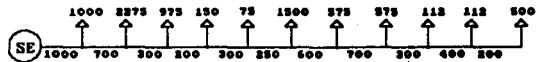
**** Caída total del alimentador = 102.250V

Porcentaje de caída = 0.44%

Caída en base de 127 volts = 0.5646V

Subestación ODOM DE BUEN
Alimentador ODB-29

19



008-29 Subestación Odon de Buen

Demanda máxima = 299 Amp.
Número de tramos = 11
Factor de utilización = 1.51755809
Carga total instalada = 7849 kVA
Longitud total del troncal = 4950 m

Tramo	Longitud (m)	Carga instalada (kVA)
1	1000	1000
2	700	2275
3	300	975
4	200	150
5	300	75
6	250	1500
7	600	575
8	700	575
9	300	112
10	400	112
11	200	500

***** Caída total del alimentador = 316.158V

Porcentaje de caída = 1.37%

Caída en base de 127 volts = 1.7457V

ALIMENTADOR MENOR A 30 KM

Demanda máxima = 300 Amp.
Número de tramos = 1
Factor de utilización = 1
Carga total instalada = 12000 kVA
Longitud total del troncal = 5000 m

Tramo	Longitud (m)	Carga instalada (kVA)
1	5000	12000

**** Caída total del alimentador = 648.082V

Porcentaje de caída = 2.82%

Caída en base de 127 volts = 3.5785V

Se realizaron las siguientes tablas para visualizar los resultados:

ALIMENTADOR Caída de tensión
en base de 127 V.

LEC-21	4.73
CJM-23	0.95
CHA-21	4.57
COA-28	9.15
NET-27	3.15
CRS-21	4.06
IZT-28	5.60
RES-24	1.75
MER-28	0.79
Huizachal	0.56
ODB-29	1.74

I	-----I				I
I	L total	Alim.	L troncal	Caída > 3.5 V	I
I	-----I				I
I	L > 100 km	LEC-21	16.45	X	I
I		CJM-23	23.80		I
I	-----I				I
I	100 km > L > 50 km	CHA-21	7.15	X	I
I		COA-28	29.60	X	I
I		NET-27	10.55		I
I	-----I				I
I	50 km > L > 30 km	CRS-21	15.15	X	I
I		IZT-28	10.75	X	I
I		RES-24	10.00		I
I	-----I				I
I	L < 30 km	MER-28	4.20		I
I		Huizachal	2.15		I
I		ODB-29	4.95		I
I	-----I				I

Se comprobó que los alimentadores de menos de 30 km totales no presentan ningún problema. Se encontró también que algunos de los alimentadores muestreados de los demás grupos si exceden los 3.5 V de la recomendación, sin embargo, no se puede afirmar que estos alimentadores provoquen problemas de regulación al usuario por que es posible que la red de baja tensión sea corta o que al elevar la tensión por medio de los cambiadores de derivación manuales de los transformadores de distribución sea suficiente para corregir el problema.

Concluimos que en general el estado de la regulación en el área metropolitana es buena, ya que por lo menos 85% de los alimentadores tienen caídas menores a la recomendada, pero del restante 15% algunos alimentadores quedan fuera de la recomendación, por lo que sería conveniente detectar con mayor detalle cuales dentro de este grupo presentan problemas de regulación para corregirlos y mejorar la calidad del servicio.

Cabe mencionar que algunos de los problemas de regulación ya detectados se han presentado en alimentadores de 6 kV. Sin embargo estos alimentadores se encuentran dentro del proceso de cambio de tensión y reconfiguración por lo que escapan a el alcance de este trabajo, ya que probablemente al incluirlos dentro de los alimentadores con problemas, estos ya estarían corregidos por el cambio de tensión.

IV.- ANALISIS DE LOS DIFERENTES METODOS DE REGULACION

IV.1 Reguladores de tensión.

El regulador de tensión es una de las soluciones adoptadas para controlar en forma automática las variaciones de tensión originadas por la carga. Permite reducir considerablemente la diferencia entre los voltajes con carga máxima y carga mínima, ya que se puede mantener la tensión dentro de un rango determinado, como lo muestran los siguientes perfiles de tensión:

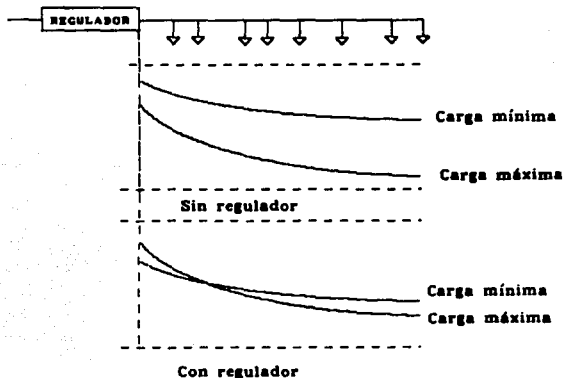


figura IV.1

Dentro de la clasificación de regulador de tensión podemos incluir a los cambiadores automáticos de derivación (o LTC, Load-tap-changing) instalados en los transformadores de potencia y a los aparatos expresamente diseñados para regular, es decir, los reguladores de tensión. Existen dos tipos de

reguladores de tensión: regulador de pasos y regulador de inducción, aunque este último prácticamente ha desaparecido y no se tratara en este estudio.

IV.1.1 Cambiador de derivaciones

El cambiador de derivaciones es frecuentemente usado en transformadores de subestación para mantener el bus de mediana tensión regulado independientemente de las variaciones en la carga y/o en la tensión en el primario. Un diagrama esquemático del cambiador de derivaciones se muestra en las figuras IV.2a y b. El principio de funcionamiento se basa en agregar o quitar vueltas del devanado primario, aumentando o disminuyendo de esta manera la relación de transformación y por ende, la tensión en el secundario.

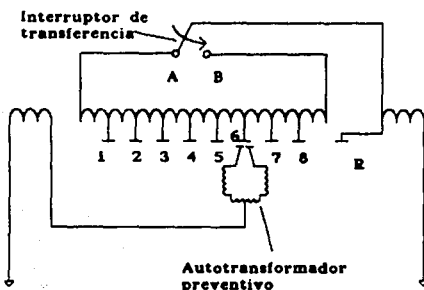


figura IV.2a

Los cambios de derivación son realizados por un motor que cambia la posición de los contactos obedeciendo las señales de el control que se describirá posteriormente. Como se muestra en la figura los contactos se conectan a el resto del devanado a través de un autotransformador preventivo con dos contactos. Al producirse un cambio de derivación uno de los contactos se

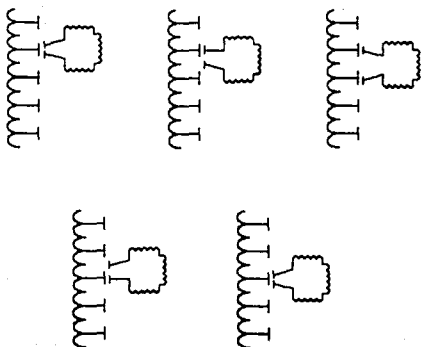


figura IV.2b

mueve al siguiente tap mientras el otro mantiene el circuito cerrado. Al llegar el primer contacto al siguiente tap se inicia el movimiento del segundo contacto. De esta manera, la circulación de corriente nunca se interrumpe y se evita el problema de interrupción (arco eléctrico, calentamiento, etc.)

El autotransformador preventivo presenta una alta impedancia a la circulación de corriente entre dos derivaciones adyacentes y una baja impedancia a la circulación de la corriente de carga, evitando así daños al devanado del transformador y permitiendo una posición intermedia entre dos derivaciones (un contacto en cada derivación). Tomando en cuenta estas posiciones intermedias es posible tener, por ejemplo, 16 cambios de tensión con solo 8 derivaciones.

Se cuenta además con un interruptor que permite cambiar la conexión del devanado del cambiador de derivaciones de manera que las vueltas contenidas en él queden en oposición a las demás vueltas del devanado primario, de manera que al incluir

más vueltas disminuyamos la tensión en el secundario. Operando este interruptor automáticamente duplicamos una vez más el número de cambios de tensión posibles, teniendo ahora en el ejemplo anterior 32 cambios con 8 derivaciones.

Siguiendo la secuencia de operación desde el punto de voltaje más bajo al más alto se tiene el devanado del cambiador de derivaciones en oposición al devanado principal, con todas las vueltas incluidas (contactos en el tap 8). Posteriormente se irán restando vueltas hasta el último tap (tap 1) y después al punto neutro, ya que la disposición física de los interruptores es en círculo. En este momento el interruptor de transferencia cambiara de posición, y se comenzaran a sumar vueltas desde el tap 8 hasta el tap 1.

Aunque con el uso de dos contactos se evita el interrumpir toda la corriente de carga, una corriente relativamente pequeña se corta al pasar un contacto. Cuando la capacidad del transformador o regulador se incrementa, esta corriente puede ser considerable, por lo que se usan interruptores auxiliares además de los contactos como se muestra en la figura IV.3.

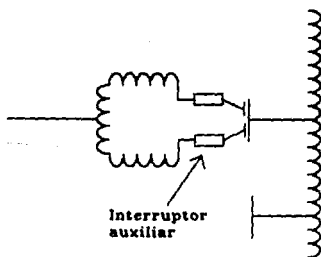


figura IV.3

Estos interruptores se abren un instante antes que el

contacto inicie su movimiento y se cierran un instante despóes de que el contacto ha llegado a su posición.

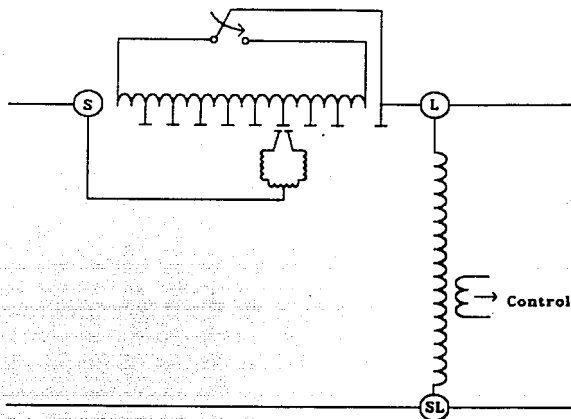


figura IV.4

IV.1.2. Regulador de pasos

IV.1.2.1. Principio de funcionamiento y tipos constructivos

El regulador de pasos está formado principalmente por un autotransformador con cambiador de derivaciones sumergido en aceite y un circuito de control integrados en una sola unidad. El cambiador de derivaciones en el regulador de pasos funciona bajo el mismo principio que se describió para el cambiador de derivaciones en transformador de potencia. Como se muestra en la figura IV.4, el funcionamiento de este aparato se basa simplemente en aumentar, disminuir u oponer vueltas al devanado

serie del autotransformador provocando aumento o disminución de la tensión de salida. Se tienen en el regulador tres terminales, una que se conecta al lado de la fuente (S), otra para la carga (L) y una más común a la carga y a la fuente (SL).

Generalmente la construcción de los reguladores de pasos se hace sobre un solo núcleo y un solo devanado del que se toman las derivaciones. Es necesario además para obtener las señales del control contar con un transformador de potencial que obtenga la tensión de salida o de carga y un transformador de corriente.

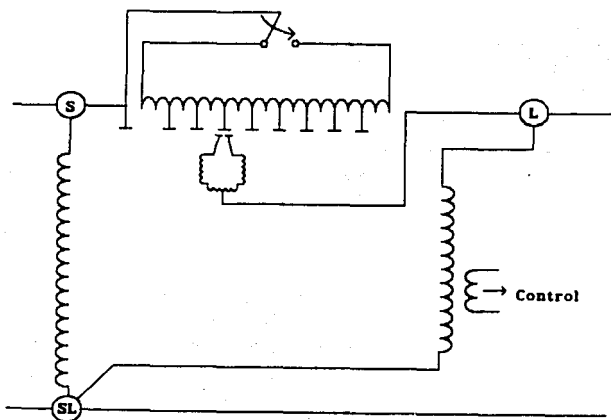


figura IV.5

Sin embargo, dependiendo de la aplicación, el fabricante y la carga, existen tres formas diferentes de construcción, mostradas esquemáticamente en las figuras IV.4, IV.5 y IV.6. La más común tiene la bobina serie en el lado de entrada, con un

solo núcleo y un solo embobinado principal, tomando la señal de voltaje directamente de la bobina en paralelo. Otra construcción común es la bobina serie en el lado de la carga, siendo diferente de la anterior únicamente en que es necesario contar con un transformador de potencial extra para obtener la señal de tensión en la salida.

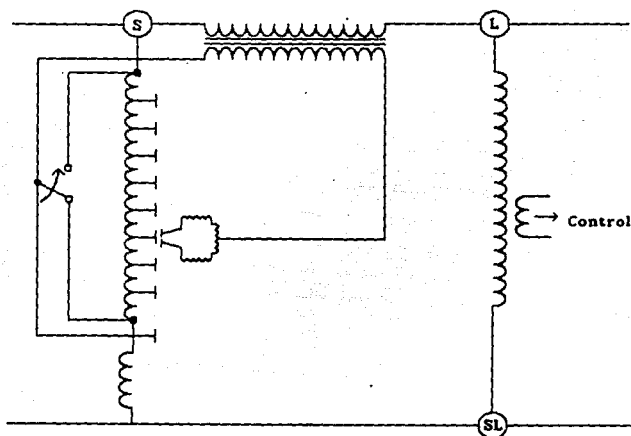


figura IV.6

El tercer tipo constructivo coloca el cambiador de derivaciones en la bobina en paralelo e induce un potencial en la bobina serie según se muestra en la figura IV.6, haciendo de este diseño el más complicado y costoso, ya que requiere de un transformador serie y un núcleo extra. Su aplicación se justifica cuando la corriente de carga excede la capacidad del cambiador de derivaciones, ya que en este tipo de diseño no circula la corriente de carga por los contactos del cambiador.

IV.1.2.2. Tipos de conexión y posición del regulador con respecto al sistema

Un regulador puede ser conectado al sistema de diferentes maneras de acuerdo a las necesidades. Se fabrican reguladores trifásicos y monofásicos, siendo generalmente aplicados los trifásicos a subestaciones mientras que los monofásicos se aplican tanto en subestaciones como en alimentadores.

Un regulador monofásico se puede aplicar a un alimentador monofásico de 2 hilos, como en el caso de algunos alimentadores rurales que alimentan cargas muy alejadas de su correspondiente subestación. En un sistema trifásico de 3 hilos se pueden conectar 3 reguladores en delta o solamente dos reguladores en delta abierta regulando las tres fases. En un sistema trifásico de 4 hilos se pueden conectar tres reguladores en estrella, con el neutro aterrizado. No se recomienda conectar tres reguladores en estrella flotante en sistemas de 3 hilos, ya que el neutro puede variar su voltaje y alterar el control del regulador, haciéndolo operar en forma inadecuada.

La posición del regulador o banco de reguladores en el sistema depende también de las diferentes condiciones y consideraciones económicas. Se puede regular el bus de mediana tensión en la subestación, ya sea por medio del cambiador de derivaciones en el transformador de potencia (sistema generalmente utilizado en el Área metropolitana de la Ciudad de México) o con reguladores aplicados directamente al bus. Este sistema es el más simple pero tiene la desventaja de no tomar en cuenta las diferencias entre alimentadores. En otras palabras, si los alimentadores conectados a ese bus tienen longitudes diferentes, tendrán caídas diferentes en su punto más alejado. Si la carga de un alimentador es industrial y de otro conectado al mismo bus es doméstica, sus cargas pico se presentaran en diferentes horas. Si la carga de un alimentador es muy grande y la de otro conectado al mismo bus es muy pequeña, sus caídas de tensión serán muy diferentes. Por lo anterior la regulación de bus solamente es recomendable cuando

los alimentadores tienen características similares en cuanto a carga y longitud, o cuando no existen problemas de regulación.

También se puede regular cada alimentador en forma independiente, desde la subestación o a lo largo del alimentador en el punto que sea necesario, (este aspecto se comentara más adelante). Con este sistema se puede obtener una regulación muy precisa, con la desventaja de incrementar el costo considerablemente por el uso de varios bancos de reguladores. Se puede aplicar este sistema cuando en una subestación con muchos alimentadores solo algunos presentan problemas de regulación o cuando los alimentadores tienen características muy diferentes.

En muchos casos, los distintos alimentadores de una subestación son diferentes pero es posible agrupar a los que tengan características comunes. En estos casos es posible aplicar una solución intermedia, colocando un banco de reguladores para cada grupo de alimentadores con características similares. Así, por ejemplo, si se tiene en una subestación alimentadores industriales con cargas y longitudes similares y alimentadores domésticos también con parámetros similares se pueden aplicar dos bancos de reguladores, uno para cada grupo, o si en la subestación existen dos buses conectados a diferentes transformadores, tratar de asignar cada grupo de alimentadores a un bus diferente.

Además se cuenta con la posibilidad de incrementar la capacidad de corriente y potencia del regulador disminuyendo su rango de regulación. De esta manera se puede lograr un incremento de hasta 160% en la capacidad disminuyendo el rango de regulación a $\pm 5\%$, en un regulador donde el rango normal sea $\pm 10\%$.

Combinando las tres características antes mencionadas (conexión del banco de reguladores, posición del banco o bancos en el sistema y disminución del rango de regulación) se pueden lograr muy distintos esquemas de regulación. El costo de

cada una de las soluciones es diferente, sin embargo generalmente es posible listarlas de la más cara a la más barata. Como ejemplo se puede citar el siguiente orden.

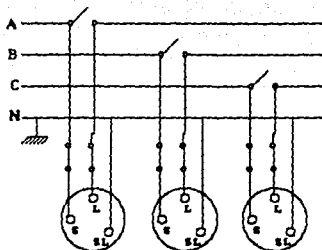
- 3 reguladores monofásicos en cada alimentador en la subestación
- 2 reguladores monofásicos en delta abierta en cada alimentador en la subestación
- 1 regulador trifásico en cada alimentador en la subestación
- 3 reguladores monofásicos o 2 reguladores monofásicos en delta abierta en cada alimentador en un punto intermedio del alimentador
- 1 regulador trifásico en el bus
- 3 reguladores monofásicos o 2 reguladores monofásicos en delta abierta en cada alimentador en un punto intermedio del alimentador con rango de regulación reducido a $\pm 5\%$
- Cambiador de derivaciones en el transformador de potencia

IV.1.2.3. Protección y medios de desconexión del regulador

La protección contra sobretensiones en el regulador se logra através de apartarrayos. Algunos fabricantes incluyen en la construcción del aparato un apartarrayos colocado entre las boquillas S y L (fuente y carga) del regulador para proteger la bobina serie. También es recomendable conectar un apartarrayos entre la boquilla L (carga) y tierra para proteger la bobina en paralelo.

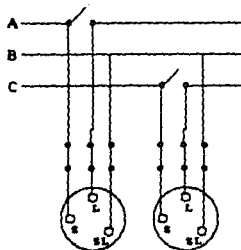
Es necesario que el regulador cuente con un medio de desconexión, que permita dar mantenimiento al regulador y conectarlo o desconectarlo a la línea sin interrumpir el servicio. Esto se logra por medio de cuchillas que pueden estar integradas en el diseño del regulador o conectarse externamente, tal como se muestra en las figuras IV.7 y IV.8

ESTA TERCERA NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA



Conexion estrella

figura IV.7



Conexion delta abierta

figura IV.8

En aplicaciones monofásicas o en estrella debe haber tres cuchillas. Una desconecta la terminal S, otra desconecta la terminal L y la tercera que permite cerrar la línea en caso de estar fuera el regulador, conocida como cuchilla de bypass. En aplicaciones en delta es necesaria además una cuarta cuchilla entre la terminal SL y la fase a que este conectada dicha terminal. A través de este juego de cuchillas es posible desconectar el regulador sin interrumpir el servicio, siguiendo el siguiente procedimiento:

- Cambiar el control del regulador de automático a manual
- Colocar manualmente el cambiador de derivaciones a posición neutral (de esta manera las terminales S y L tendrán el mismo voltaje, evitándose arcos)
- Cerrar la cuchilla de bypass
- Abrir las cuchillas de las terminales S y L y la cuchilla de la terminal SL en aplicaciones en delta, en ese orden.

Si siguiendo el procedimiento a la inversa es posible conectar el regulador sin interrumpir el servicio.

IV.1.3. Control

La función principal del control en el regulador o en el transformador de potencia es proporcionar las señales necesarias para que el cambiador de derivaciones realice automáticamente los cambios de tap necesarios para mantener la tensión de salida dentro de un rango determinado. Sin embargo el circuito de control es usado también para proporcionar medición y en ocasiones está capacitado para recibir señales de control remoto. Básicamente el control está formado por los bloques indicados en la figura IV.9

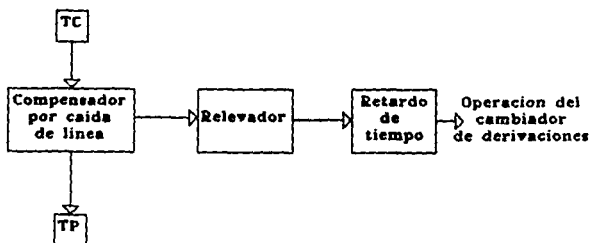


figura. IV.9

IV.1.3.1 Principio de funcionamiento y tipos constructivos

El relevador recibe la señal proveniente del transformador de potencial colocado en las terminales de salida del regulador (L y SL). Si la tensión es menor que el valor de ajuste un contacto es cerrado para iniciar la operación del cambiador de derivaciones e incrementar la tensión. De la misma manera, si la tensión es mayor al valor de ajuste, otro contacto es cerrado para que el cambiador de derivaciones opere y la tensión de salida sea disminuida.

Es necesario definir a que diferencia de tensión con respecto a la tensión de ajuste se realizara el cierre de contactos. La diferencia entre la tensión que iniciara la disminución y la tensión que iniciara el aumento de tensión es conocida como ancho de banda del relevador. Debido a que la tensión puede estar justo por arriba de la tensión que inicia el incremento de tensión, el ancho de banda del relevador debe ser tomado en cuenta para calcular la caída de tensión de la línea, ya que si solo se toma en cuenta el valor de ajuste es posible que la tensión en alguna acometida salga fuera de el valor permitido, como se muestra en el siguiente perfil de voltaje:

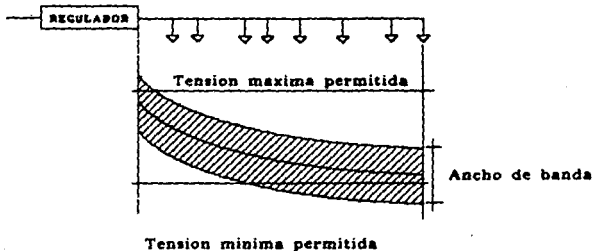


fig. IV.10

Esta diferencia entre la tensión de ajuste y la tensión de cambio debe ser siempre mayor que el cambio de tensión proporcionado por un paso del cambiador de derivaciones.

Entre más pequeño sea el ancho de banda del relevador, la caída total del alimentador sera menor, mejorando la regulación, pero se incrementará el número de operaciones, causando un mayor desgaste y la necesidad de mantenimiento más frecuente. Por lo tanto es necesario encontrar un balance entre estos dos parámetros.

El control cuenta también con un retardador de tiempo, cuya función es evitar que el cambiador de derivaciones opere durante disturbios momentáneos, reduciendo el número de operaciones.

La operación se produce entonces de la siguiente manera: el relevador recibe la señal de tensión a la salida del regulador y si es mayor al límite establecido por su ancho de banda activa el retardador de tiempo. Si la condición de tensión alta se mantiene por más tiempo que el de ajuste del retardador, este manda la señal al cambiador de derivaciones para que este opere y disminuya la tensión de salida. Si la tensión regresa a la banda de ajuste, el retardador se desactiva y la operación no se produce. Para aumentar la tensión el procedimiento es similar.

El ajuste del ancho de banda del relevador y del tiempo de retardo puede ser difícil por que depende de el número de fluctuaciones momentáneas que se tengan en cada línea y de la duración de estas, datos que no se conocen en la mayor parte de los casos.

Existen dos tipos de controles: los electromagnéticos y los de estado sólido. En los electromagnéticos el relevador es generalmente del tipo de inducción en disco con dos contactos. La operación se produce al girar el disco hacia un lado u otro, según la señal del transformador de potencial, por efecto de inducción. Este tipo de relevador tiene un tiempo de retardo inherente al mecanismo, ya que el disco tarda un tiempo determinado en girar hasta cerrar el contacto. Se puede agregar otro retardo de tiempo mayor con un relevador de retardo de tiempo del tipo térmico bimetalico. Este tipo de control se puede encontrar en algún regulador, pero ha sido prácticamente reemplazado por el control de estado sólido en los diseños recientes, ya que este último control es más barato y preciso, además de poder realizar otras funciones como se verá más adelante.

El control de estado sólido se forma, según los distintos fabricantes, por circuitos electrónicos con elementos discretos o por circuitos microprocesados. Los diseños recientes tienden a utilizar microprocesadores por la versatilidad que se logra con estos y la disminución en el costo del control. Este tipo de control está formado principalmente por el microprocesador, una memoria que almacena el programa que dirige al procesador y los valores de ajuste, y circuitos auxiliares. La señal de tensión llega en forma digital al microprocesador a través de un convertidor analógico-digital, generalmente de 12 bits, logrando con esto una gran precisión. La detección de alto o bajo voltaje se logra por medio de un amplificador diferencial o comparador, como el que se muestra en la figura IV.11, o por la misma programación del procesador.

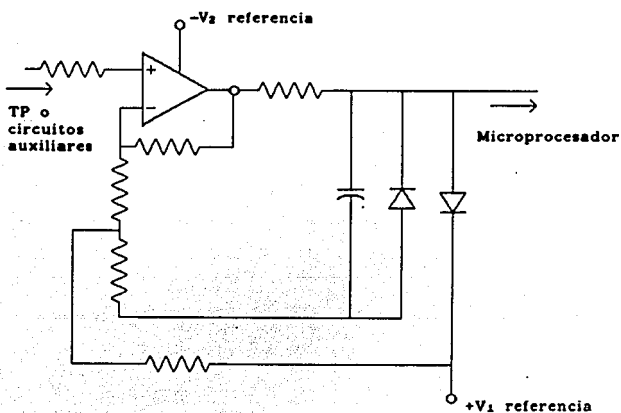


figura IV.11

El hecho de contar con memoria y el microprocesador, proporciona a el control una gran versatilidad para realizar

otras funciones. Con los controles más modernos es posible realizar la medición instantánea del voltaje, la corriente, el factor de potencia, la potencia real y reactiva, la frecuencia e inclusive las magnitudes y frecuencias de voltajes y corrientes armónicas. También es posible saber el valor máximo de demanda en un cierto periodo; el valor máximo y mínimo de voltaje que se presentaron en un cierto periodo, tanto a la entrada como a la salida del regulador; el número de operaciones que realizó y otras funciones. Todos estos datos son útiles para posteriores ajustes del propio regulador, pero pueden ser útiles también para otros estudios del sistema.

Existen accesorios que pueden ser conectados a estos controles para grabar toda la información contenida en ellos y posteriormente vaciar esta información en una computadora, permitiendo la creación de un banco de datos. También es posible realizar comunicaciones entre el control y una estación remota, ya sea para transmitir información de la línea a la estación o para que el regulador sea controlado en forma remota.

IV.1.3.2. Compensación por caída de tensión en la línea.

La compensación por caída de línea se aplica cuando se desea mantener la tensión constante en algún punto del alimentador lejano al regulador, ya sea por que se tiene interés particular en ese punto o por que se desea que el regulador utilice para su ajuste el valor de caída de tensión que se este dando realmente en la línea con las cargas conectadas y el factor de potencia que se tengan en ese momento, además de reducir considerablemente la diferencia de tensión con carga máxima o mínima.

Para poder realizar esta compensación es necesario que el relevador del regulador reciba en sus terminales una señal de tensión igual a la que se tiene en el punto de regulación. Para lograr lo anterior se debe simular dentro del regulador una

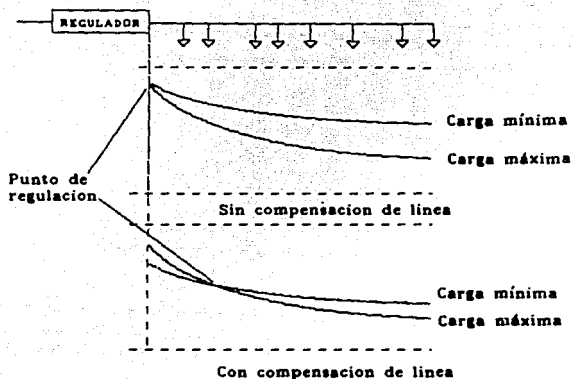


figura IV.12

caída igual a la que se da realmente en la línea con las condiciones presentes de carga y factor de potencia. Si se toma por medio de un transformador una señal de corriente y se aplica a una impedancia proporcional a la impedancia de la línea entre la salida del regulador y el punto de regulación, se obtendrá una caída de tensión proporcional a la que se tiene en la línea y si por último insertamos esta impedancia en serie entre el transformador de potencial y el relevador como se muestra en la figura IV.12 el regulador operara ajustando su valor de salida a los cambios que se produzcan en el punto de regulación.

En los reguladores con relevador de inducción la compensación de línea se consigue mediante la inserción real en el sistema de elementos resistivos y reactivos proporcionales a los de la línea. En los controles de estado sólido estos valores son simulados dentro del control por circuitos electrónicos o por la programación del procesador.

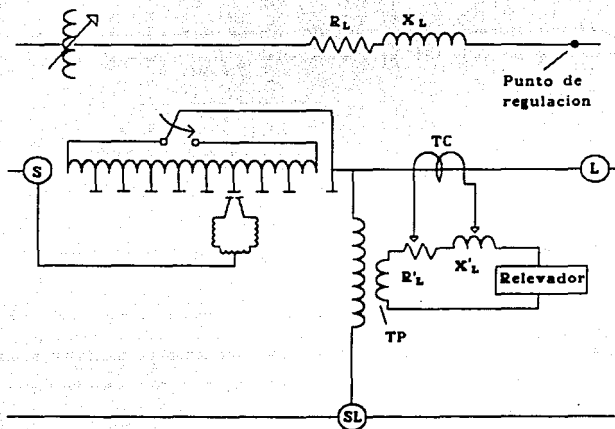


figura IV.13

Los valores de resistencia y reactancia proporcionales a la línea se ajustan en ohms, pero en la práctica las fórmulas desarrolladas para su cálculo y las instrucciones de ajuste en los manuales mencionan estas cantidades en volts. Esto se debe a que el transformador de corriente generalmente proporciona señales de 1 A, y aunque no sea este el caso en reguladores recientes se ha generalizado esta manera de ajustar el compensador de línea.

IV.1.4 Algunos parámetros de selección y ajuste de reguladores.

IV.1.4.1 Selección y localización del regulador

Los reguladores de tensión son generalmente construidos para proporcionar una regulación de $\pm 10\%$ en 32 pasos, cada

uno de 5/8%. A diferencia de otros equipos, no se especifican para la potencia que maneja la línea, sino para la potencia que regulan. Si, por ejemplo, se desea regular un alimentador (3F, 4H) de 10,000 kVA con +/- 10% de regulación, deberá seleccionarse un regulador trifásico de 1,000 kVA, por que esta sera la potencia máxima regulada.

Como se menciona anteriormente, en muchas aplicaciones es posible obtener una buena regulación con un rango menor a +/- 10%. Generalmente existe en los reguladores la posibilidad de aumentar la capacidad de corriente y potencia hasta en un 60% disminuyendo el porcentaje de regulación de 10 a 5%.

Partiendo de las tensiones máxima y mínima que se deben tener en el alimentador y conociendo o estimando las variaciones de la tensión de entrada al regulador podemos encontrar aproximadamente el rango de regulación requerido. Si:

$$V_1 = V_{Emax}(1-R) - V_{D1} + (V_B/2) \quad \dots \quad IV.1$$

$$V_2 = V_{Emin}(1+R) - V_{D2} - (V_B/2) \quad \dots \quad IV.2$$

V_1 - Tensión máxima que podemos permitir en el primer transformador del alimentador

V_2 - Tensión mínima que podemos permitir en el último transformador del alimentador

V_{Emax} - Tensión máxima esperada a la entrada del regulador

V_{Emin} - Tensión mínima esperada a la entrada del regulador

V_{D1} - Caída de tensión del regulador al primer transformador

V_{D2} - Caída de tensión del regulador al último transformador

V_B - Ancho de banda del regulador

R - Porcentaje de regulación

Podemos despejar R de las dos ecuaciones y así tener una aproximación del rango de regulación requerido:

$$R = \frac{V_{E_{\max}} - V_1 - V_{D1} + (V_B/2)}{V_{E_{\max}}} \quad \dots \quad \text{IV.3}$$

$$R = \frac{V_2 - V_{E_{\min}} + V_{D2} + (V_B/2)}{V_{E_{\min}}} \quad \dots \quad \text{IV.4}$$

Para la primera ecuación se deben usar los valores de carga mínima y para la segunda los valores de carga máxima. El ancho de banda del regulador se puede estimar en un 2% de la tensión nominal. De estas dos ecuaciones obtendremos resultados diferentes, por lo que el valor mayor debe ser usado. Una vez seleccionado el porcentaje de regulación necesario se puede especificar de manera más adecuada la capacidad del regulador.

En general la capacidad del regulador quedara dada por la siguiente ecuación:

$$kVA_R = R \times E \times I \quad \dots \quad \text{IV.5}$$

Donde:

kVA_R - Capacidad del regulador

R - Porcentaje de regulación

E - Tensión aplicada entre las terminales S y SL del regulador

I - Corriente de fase

En aplicaciones monofásicas esta ecuación proporciona directamente la capacidad del regulador a utilizar. En aplicaciones trifásicas formadas por tres reguladores monofásicos conectados en estrella, de esta ecuación se obtendrá la capacidad de cada regulador utilizando la tensión de fase a neutro.

En aplicaciones donde se utilicen dos reguladores conectados en delta abierta, la capacidad quedará dada por la misma ecuación, pero esta vez la tensión será la de fase a fase. Es posible utilizar esta configuración por que un incremento en la tensión AB y en la tensión BC, forzara un

incremento en la tensión CA, como se muestra en las siguientes ecuaciones y diagrama fasorial. Si suponemos originalmente la magnitud de V_{CA} , V_{BC} y V_{BA} iguales a uno y posteriormente forzamos las dos últimas a una magnitud de 1.1 tenemos:

$$V_{CA} = V_{BA} - V_{BC}$$

$$V_{CA} = 1.1 \angle 150^\circ - 1.1 \angle 210^\circ = -0.9526 + j0.55 + 0.9526 + j0.55$$

$$V_{CA} = 1.1 \angle 90^\circ$$

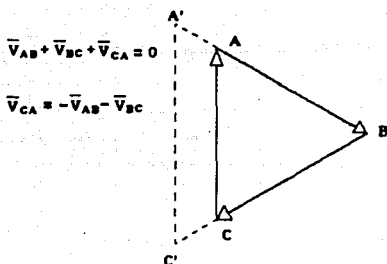


figura IV.14

Como se puede ver de la ecuación general para cálculo de la capacidad, agregar un tercer regulador para tener una delta completa no permite al banco de reguladores aumentar su capacidad, ya que la tensión entre las terminales y la corriente de fase son las mismas en los dos casos. Sin embargo, incrementa el rango de regulación en un 50% aproximadamente, ya que cada tensión de fase a fase es forzada a su valor final por los tres reguladores. Suponiendo que originalmente las tres tensiones tienen una magnitud igual a 1, y que V_{BA} es forzado por su regulador a aumentar su magnitud en 10%, con los otros dos reguladores fijos, entonces V_{CA} se verá afectado de la

siguiente manera:

$$V_{CA} = 1.1 \angle 150^\circ - 1 \angle 120^\circ = -0.9526 + j0.55 + 0.866 + j0.5$$

$$V_{CA} = 1.0535 \angle 94.71^\circ \quad \text{en las terminales de entrada del regulador}$$

Si ahora forzamos la tensión CA, por medio de su regulador, a aumentar su magnitud en 10%:

$$V_{CA} = 1.1589 \angle 94.71^\circ \quad \text{a la salida del regulador}$$

Calculando la tensión BC con estos nuevos valores de V_{CA} y V_{BA} :

$$V_{BC} = V_{BA} - V_{CA} = 1.0493 \angle 216^\circ \quad \text{a la entrada del regulador}$$

$$\text{y } V_{BC} = 1.15426 \angle 216^\circ \quad \text{a la salida del regulador}$$

Por último, si calculamos nuevamente el valor de V_{BA} , que ya no podría aumentar su magnitud debido a que ya tendría todas las vueltas extras de devanado incluidas, obtenemos:

$$V_{BA} = V_{CA} + V_{BC} = 1.1478 \angle 205.24^\circ$$

Aunque el proceso no se da realmente de esta forma, sino que los cambios se realizan paulatinamente en cada uno de los reguladores, además de que las tensiones tienden a quedar balanceadas, estos cálculos permiten observar como se consigue un aumento de 10 a aproximadamente 15% de regulación incluyendo un tercer regulador y como se provoca un desplazamiento angular entre las tensiones de entrada y salida del regulador. Estos dos efectos se muestran en el diagrama fasorial de la figura IV.15.

En aplicaciones donde un rango de regulación de +/- 10% es suficiente, se pueden utilizar tres reguladores en delta, cada uno con regulación de +/- 7%, para así aumentar su capacidad.

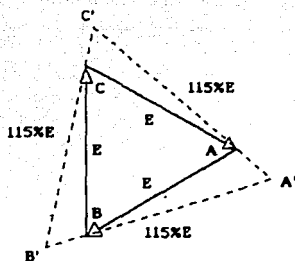


figura IV.15

Para seleccionar un regulador trifásico hay que multiplicar la capacidad del alimentador por el porciento de regulación:

$$kVAR = R \times kVA_{a}$$

kVA_{a} - Capacidad del alimentador

Para seleccionar el control del regulador debe tomarse en cuenta su precisión. Un error en la precisión del control resultara en una inadecuada operación del regulador. Las fuentes principales de estos errores son la imprecisión de los transformadores de instrumento (corriente y potencial) y en menor medida la imprecisión del relevador y los circuitos de control asociados. Según NEMA existen tres clases de precisión para el control de reguladores:

Clase 1	+/- 1% de error	
Clase 2	+/- 2%	•
Clase 3	+/- 5%	•

Actualmente y con el desarrollo de controles microprocesados y transformadores de instrumento cada vez más precisos, la mayoría de los controles pertenecen a la clase 1.

El número y forma de aplicación de los reguladores a utilizar dependen de las condiciones en cada caso y pueden ser determinados según los criterios descritos anteriormente. En cuanto a la localización de estos reguladores, se pueden clasificar en dos grupos: reguladores en subestación (bus, grupos de alimentadores, alimentadores individuales) y reguladores en el alimentador. Para estos últimos es necesario establecer en que punto del alimentador se van a colocar. Esta forma de regulación se aplica principalmente en alimentadores muy largos y puede ser combinada con regulación en la subestación (regulación de bus), en los casos que la caída de tensión, aún con el bus regulado exceda los límites permisibles, como se observa en la figura IV.16.

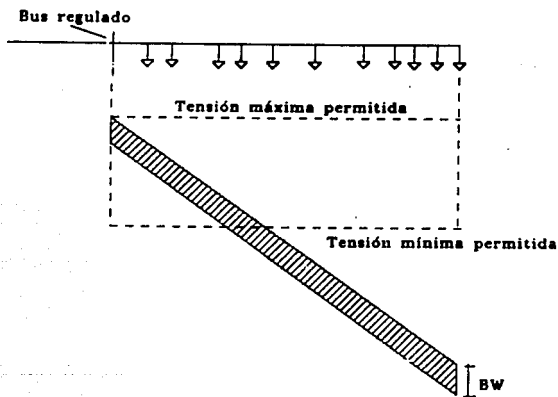


figura IV.16

En este caso se debe aplicar un regulador funcionando como elevador de tensión en el punto en que la tensión cae por debajo del límite permisible en condiciones de carga máxima. Algunas veces se puede elevar la tensión por medio de los

cambiadores de derivación manuales de los transformadores de distribución o con un transformador, pero de esta manera es posible que en condiciones de carga mínima esto provoque una tensión mayor a la permitida, por lo que se debe utilizar un regulador. Si el alimentador es extremadamente largo y tiene pocas cargas pero muy grandes, puede ser necesario conectar un segundo regulador sobre el alimentador, como lo muestra el siguiente perfil de tensión.

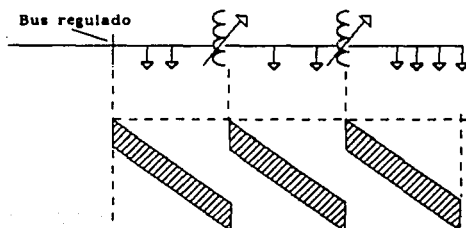


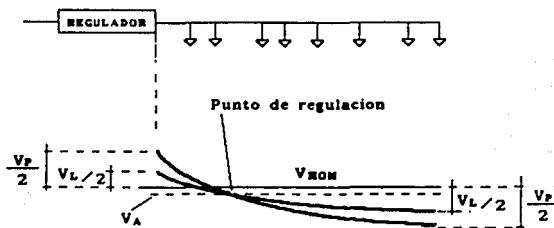
figura IV.17

IV.1.4.2. Ajuste del compensador por caída de línea

Para ajustar el compensador por caída de línea se debe localizar el punto de regulación y posteriormente determinar los valores de resistencia y reactancia que simularan la línea. Sin embargo en muchas ocasiones no habrá un punto de particular interés en el alimentador que pueda ser regulado. En esta situación se puede aplicar el siguiente procedimiento para localizar el punto de regulación.

Calcular la caída de tensión hasta el último transformador en condiciones de carga máxima. Suponer en el primer transformador una tensión igual a la tensión nominal más la mitad de la caída de tensión calculada y dibujar el perfil de tensión correspondiente. Calcular la caída de tensión en

condiciones de carga mínima. Suponer en el primer transformador una tensión igual a la tensión nominal más la mitad de la caída de tensión calculada para carga mínima y dibujar el perfil de tensión correspondiente sobre la misma gráfica del perfil anterior, tal como se muestra en la figura IV.18



V_p - caída de tensión total, carga máxima

V_L - caída de tensión total, carga mínima

V_A - tensión de ajuste

figura IV.18

El punto donde los perfiles de tensión se cruzan puede ser escogido como punto de regulación, en el que la tensión encontrada en el diagrama deberá ser mantenida.

El siguiente paso es ajustar el compensador de línea con los valores de resistencia y reactancia correspondientes. Esto se logra mediante las siguientes ecuaciones:

$$R_A = \frac{R_{TC} + R_{EF}}{R_{TP}} \quad \dots \quad \text{IV.7}$$

$$X_A = \frac{R_{TC} + X_{EF}}{R_{TP}} \quad \dots \quad \text{IV.8}$$

Donde:

R_A y X_A - Resistencia y reactancia de ajuste

R_{ER} y X_{ER} - Resistencia y reactancia efectivas desde el regulador hasta el punto de regulación

RTC - Relación de transformación del transformador de corriente

RTP - Relación de transformación del transformador de potencial

En algunos controles microprocesados de diseño reciente, no es necesario utilizar los valores de relación de transformación, y el valor de ajuste es directamente el valor efectivo. Si no existen cargas entre el regulador y el punto de regulación la resistencia y reactancia efectivas pueden ser calculadas facilmente conociendo la configuración de la línea y el calibre de los conductores. Pero si existen cargas en este tramo estos valores no pueden ser utilizados, ya que por cada tramo entre una carga y la siguiente circula una corriente diferente a la del tramo anterior y por lo tanto se produce una caída diferente. Por lo anterior se han desarrollado las siguientes fórmulas para calcular los valores efectivos:

$$R_{EF} = \frac{V_{DR}}{I_T} \quad \dots \quad IV.9$$

$$V_{DR} = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 + \dots + I_N R_N$$

Donde:

V_{DR} - Caída de tensión que produce la resistencia de la línea entre el regulador y el punto de regulación

I_T - Corriente de carga donde está el regulador

I_1 - Corriente en el tramo de alimentador entre el regulador y la primera carga

I_2 - Corriente entre la primera y la segunda carga

I_N - Corriente entre la última carga y el punto de regulación

R_i - Resistencia del tramo de alimentador por la que circula I_i

De manera similar para la reactancia efectiva:

$$X_{EF} = \frac{V_{dx}}{I_r} \quad \dots \quad IV.10$$

$$V_{dx} = I_1 X_1 + I_2 X_2 + I_3 X_3 + \dots + I_n X_n \quad \dots \quad IV.11$$

Aunque esta ecuación proporciona un valor muy preciso de los valores efectivos tiene la desventaja de que en alimentadores reales puede resultar muy complicado obtener todos los datos necesarios para su aplicación. Existe otra forma de calcular la resistencia y reactancia efectivas basándose en el mismo principio:

$$V_{dr} = I_r R_r \cos \theta + I_r X_r \sin \theta \quad \dots \quad IV.12$$

Si medimos en el alimentador la tensión en el regulador y en el punto de regulación al mismo tiempo, obtendremos la caída de tensión real y basándonos en la ecuación anterior podemos despejar los valores efectivos. En muchas ocasiones puede resultar más simple realizar la medición directa que calcular las corrientes en cada tramo del alimentador.

Por último, en aplicaciones de delta abierta o delta completa, la corriente en el transformador de corriente estará adelantada o atrasada 30° (según el tipo de conexión) con respecto a la tensión del transformador de potencial, por lo que este efecto debe ser corregido. Esto se logra afectando los valores de resistencia y reactancia por un factor de manera que se simule la línea correctamente. Los valores ya corregidos para estas aplicaciones se pueden obtener a partir de la siguiente ecuación:

$$R' + jX' = (0.866 - j0.5)(R + jX) \quad \dots \quad IV.13$$

De donde:

$$R' = (0.866R + 0.5X)$$

$$X' = (0.866X - 0.5R)$$

Si la corriente está atrasada con respecto a la tensión y

$$R' + jX' = (0.866 + j0.5)(R + jX) \quad \dots \quad \text{IV.14}$$

$$R' = (0.866R - 0.5X)$$

$$X' = (0.866X + 0.5R)$$

Si la corriente está adelantada con respecto a la tensión.

IV.2 Capacitores

Desde que se inició, a principios del siglo XX, el uso del capacitor en aplicaciones de transmisión y distribución de energía eléctrica, así como en equipos y maquinaria eléctrica, hasta nuestros días, el capacitor de potencia ha evolucionado en forma extraordinaria tanto en su construcción como en sus aplicaciones. En la actualidad el capacitor de potencia es un elemento indispensable dentro de la ingeniería eléctrica, su aplicación para compensar la potencia reactiva demandada por la carga o compensar la reactancia inductiva de las líneas, dependiendo de la forma en que se conecte, trae como efectos el aumento en la capacidad de transmisión de potencia activa de una línea, el aprovechamiento de la capacidad de los transformadores, la regulación o incremento de la tensión en los puntos de consumo de la energía, y la disminución apreciable de las pérdidas eléctricas. En resumen la utilización de capacitores aumenta la eficiencia de la transmisión y distribución de la energía eléctrica.

En un sistema de distribución el objetivo principal que se persigue al instalar capacitores es la compensación de potencia reactiva o la compensación de la reactancia inductiva, la manera en que se conecten estos al sistema determina el tipo de compensación que se tiene, si se usan capacitores conectados en paralelo o derivación se tendrá compensación de la potencia reactiva, en cambio si se utilizan capacitores conectados en serie se estará compensando la reactancia inductiva de la línea.

IV.2.1 Capacitores en serie

En general se denomina capacitor serie a aquel capacitor que se encuentra conectado en serie con una línea. El capacitor serie produce un aumento de tensión que es directamente proporcional a la magnitud y factor de potencia de la corriente en la línea; es decir, la tensión resultante varía de acuerdo con las variaciones de la carga. Debido a esta característica se suele considerar al capacitor serie como un regulador de tensión ideal ya que su acción correctiva es instantánea por encontrarse en serie con la carga.

Los capacitores serie son utilizados en la corrección de las condiciones de tensión cuando el circuito es sumamente reactivo, cuando el factor de potencia es bajo y atrasado, y cuando la variación de la carga es rápida; sin embargo se debe tener presente que un capacitor serie no es la solución adecuada para mejorar el factor de potencia ya que su contribución de potencia reactiva es baja por lo que el incremento del factor de potencia no es significativo.

IV.2.1.1 Efecto de la instalación de capacitores en serie

En una línea la reactancia capacitiva en serie produce una caída de tensión defasado 180° respecto de la caída en la

reactancia inductiva de la línea, por lo que disminuye el efecto de esta última o inclusive si el valor de la reactancia capacitiva es tal que iguale al de la reactancia inductiva la caída de tensión resultante sería igual a cero. A este efecto se le llama compensación de la reactancia inductiva de la línea. En la figura IV.19a se representa una línea de distribución y su correspondiente diagrama vectorial :

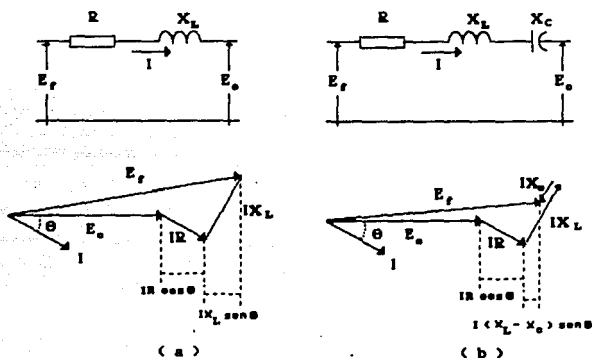


figura IV.19

Considerando que la caída de tensión aproximada en el alimentador es :

$$CT = IR \cos \theta + IX \sin \theta \quad \dots \quad IV.15$$

En el diagrama vectorial se puede observar que el segundo término de la ecuación IV.15 se hace mayor que el primero cuando el factor de potencia es bajo y también cuando la relación R / X es pequeña. Insertando un capacitor serie como

se muestra en la figura IV.19b, la caída de tensión aproximada es :

$$CT = IR\cos\theta + I(X_L - X_C)\sin\theta \quad \dots \quad IV.16$$

De donde se ve que al seleccionar la reactancia capacitiva adecuada se puede disminuir e inclusive, teóricamente, anular la caída reactiva al igualar las reactancias capacitiva e inductiva dando como resultado que la caída de tensión en la línea sea únicamente la que produce la resistencia (Ec.IV.17); pero esto último no se lleva a la práctica ya que se formaría un circuito resonante lo cual, como se verá más adelante, representa más problemas que beneficios.

$$CT = IR\cos\theta \quad \dots \quad IV.17$$

IV.2.1.1.1 Sobrecompensación.

Cuando en un alimentador la resistencia del circuito es significativa en comparación a la reactancia inductiva se puede sobrecompensar al circuito; es decir, se debe seleccionar a la reactancia capacitiva de valor mayor que la inductiva para que la caída de tensión en la línea sea el resultado de la caída resistiva menos la caída reactiva, esto es :

$$CT = IR\cos\theta - I(X_C - X_L)\sin\theta \quad \dots \quad IV.18$$

Se debe tener cuidado al seleccionar la sobrecompensación ya que si esta se calcula para carga normal se pueden presentar problemas de sobretensiones durante el arranque de motores grandes debido a la gran corriente en atraso que demandan. Esto se demuestra en los diagramas vectoriales (figura IV.20) de una línea sobrecompensada y la misma línea bajo condición de arranque de un motor grande que a continuación se presentan.

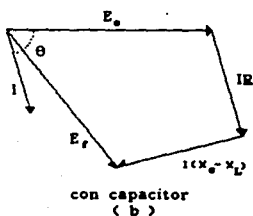
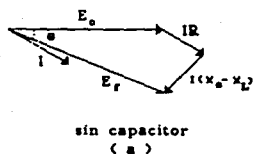


figura IV.20

IV.2.1.1.2 Circuitos con factor de potencia unitario o adelantado.

Además de la sobrecompensación existen otros dos casos particulares del efecto de los capacitores serie. El primero resulta cuando se tiene un circuito con factor de potencia igual o muy cercano a 1.0, lo que considerado en la ecuación IV.15 nos da como resultado la siguiente expresión:

$$CT = IR \quad \dots \quad IV.19$$

entonces para circuitos con factor de potencia cercano a la unidad el uso de capacitores serie no tiene prácticamente ningún efecto. Se recomienda que para aplicar un capacitor serie con resultados efectivos en las condiciones de tensión una línea la relación R / X debe ser menor que 1.0 y el factor de potencia menor que 0.90 atrasado.

El segundo caso se presenta cuando el circuito tiene factor de potencia adelantado, en esta situación la aplicación de un capacitor serie tiene efectos adversos ya que decrementa la tensión en el extremo receptor. El diagrama vectorial de la figura IV.21 nos muestra este fenómeno.

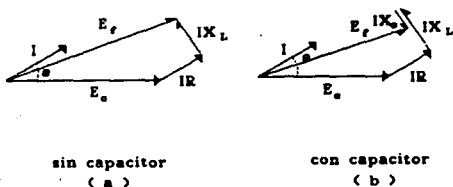


figura IV.21

IV.2.1.1.3 Resonancia.

La razón principal de que el uso de capacitores serie en sistemas de distribución no sea una práctica común es el problema de resonancia inductiva - capacitiva que existe potencialmente en este tipo de conexión. Existen dos clases de fenómenos de resonancia que se pueden presentar, estos son :

- a) Autoexcitación o resonancia subsíncrona en motores de inducción durante el arranque.

Cuando se aplica una tensión al rotor de un motor, este empieza a girar hasta alcanzar una velocidad inferior a la de sincronismo; el capacitor junto con el estator forman un circuito resonante cuya frecuencia es menor que la de la línea. Bajo esta condición resonante, la impedancia formada por la reactancia inductiva y capacitiva se reduce a un mínimo permitiendo el paso de altas corrientes que provocan el

calentamiento del motor o pares pulsantes. La frecuencia de resonancia dependera de la relación entre : Capacidad del motor, capacitor, y alimentador. Conforme se reduce la capacidad del motor en relación con la capacidad del circuito la impedancia aumenta y la frecuencia de resonancia disminuye, por lo que este problema afecta principalmente a motores de gran capacidad.

La corriente resonante fluye de acuerdo a la frecuencia natural del circuito y gradualmente se reduce a cero. Como la reducción de la corriente depende de la resistencia del circuito se emplean resistencias en paralelo con el capacitor que se desconectan después de la etapa de arranque.

b) Resonancia al energizar un transformador.

Al energizar un transformador, con poca carga o sin ella, conectado en serie con un capacitor se puede presentar resonancia si al momento de energizar el transformador la onda de tensión esta cerca de su cruce por cero ya que en este punto puede fluir una alta corriente de magnetización provocada por la saturación que causa el rápido aumento de flujo magnético. La reactancia del transformador se reduce, entonces, a la equivalente con núcleo de aire en el embobinado. La corriente resonante que se presente dura normalmente solo unos cuantos ciclos, pero por la presencia del capacitor está se puede sostener por más tiempo, de igual manera que en el caso anterior la inserción de resistencias en paralelo con el capacitor, durante el transitorio ayudan a disminuir el fenómeno.

IV.2.1.2 Aplicaciones de capacitores en serie

El análisis de los efectos provocados por un capacitor serie muestra que la aplicación de este tipo de capacitor a una

línea del sistema de distribución ofrece bondades con relación a la regulación de tensión, pero a la vez, su aplicación puede ser más negativa que positiva si no se realiza un estudio adecuado de ingeniería que permita determinar el valor de capacitancia y las precauciones necesarias que reduzcan al máximo la probabilidad de que el circuito entre en resonancia. Dado que estos estudios requieren de una inversión considerable el costo que representa para un sistema de distribución es muy alto en comparación con la utilización de capacitores en paralelo, por lo que el uso de los capacitores serie no está generalizado en los sistemas de distribución.

Actualmente, en la República Mexicana, se tienen instalados en forma experimental, y para familiarizarse con su operación, 3 bancos de capacitores serie en líneas del sistema de distribución como una alternativa para alimentadores con problemas de bajas tensiones transitorias provocadas por el arranque de grandes motores de inducción, donde, además, la instalación de bancos en paralelo implicaba un fuerte costo en equipo de desconexión y control.

IV.2.2 Capacitores en paralelo o derivación.

Un capacitor en derivación se encuentra conectado en paralelo a un circuito y tiene por objeto suministrar la potencia reactiva demandada por una carga de tipo inductivo, a partir del punto donde se localiza el capacitor. El capacitor produce una reducción de la corriente en atraso demandada por el circuito como respuesta a las variaciones de tensión que se presenten entre sus terminales y además incrementa el factor de potencia desde la fuente de energía hasta el capacitor. La reducción de la corriente y el aumento del factor de potencia traen en consecuencia otros efectos importantes como: Liberación de capacidad de un alimentador, reducción de pérdidas reales y reactivas, y el incremento de tensión en el punto de instalación.

IV.2.2.1 Efecto de la instalación de capacitores en paralelo.

Considerando la representación esquemática de una línea aérea, mostrada en la figura IV.22a, la corriente total I , se encuentra retrasada de la tensión en la carga E_c y la caída de tensión es la suma de los productos IR e IX_L .

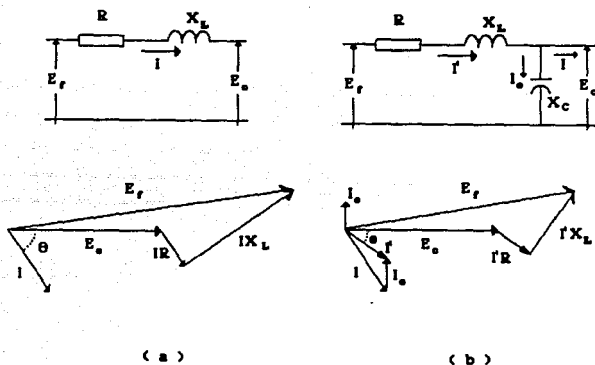


figura IV.22

Cuando se instala un capacitor en paralelo en la línea, la corriente total resultante de la línea, I' , está dada por la suma vectorial de la corriente demandada por la carga I y la corriente en el capacitor I_c . La corriente del capacitor se encuentra defasada 180° de la componente reactiva inductiva de la corriente demandada por la carga. Esto equivale a la resta vectorial de ambas corrientes, lo que repercute en una disminución de la magnitud y ángulo de fase de la corriente I ,

que se observa en IV.22b. Esta disminución en la corriente reduce, a su vez, la caída en la impedancia de la línea $I'R + I'X_L$ y por lo tanto la tensión necesaria en la fuente de alimentación E_s , para mantener un nivel de tensión en la carga, es menor.

IV.2.2.1.1 Capacidad liberada en un alimentador.

Cuando se instala un banco de capacitores en paralelo, la reducción en magnitud y ángulo de fase de la corriente del circuito se refleja directamente en la potencia aparente que debe suministrar el sistema al circuito. Dado que la magnitud de la potencia aparente con el nuevo factor de potencia es menor que la original, entonces se tiene una capacidad liberada en el alimentador. Para cuantificar la capacidad liberada se recurre a definirla como la potencia aparente que se puede agregar, con el factor de potencia original, de tal forma que la magnitud de la potencia aparente sea la misma antes y después de instalar el banco de capacitores. La siguiente figura muestra el diagrama fasorial de éste concepto.

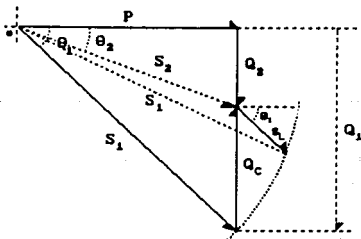


figura IV.23

donde:

- P - Potencia real del circuito
- S₁ - Potencia aparente inicial
- S₂ - Potencia aparente después de incluir capacitores
- Q₁ - Potencia reactiva inductiva inicial, demandada al sistema
- Q₂ - Potencia reactiva inductiva final, demandada al sistema
- Q_c - Potencia reactiva aportada por el capacitor
- θ₁ - Angulo del factor de potencia inicial
- θ₂ - Angulo del factor de potencia final
- SL - Capacidad liberada del alimentador

Partiendo del diagrama anterior se determina la ecuación IV.20 que permite el cálculo de la capacidad liberada en función del factor de potencia original y corregido, y de la potencia aparente antes de la instalación de los capacitores.

$$SL = S_1 [-\cos\theta_1(\cos\theta_1 + \sin\theta_1 \tan\theta_2) + \cos^2\theta_1(1 + 2\tan\theta_1 \tan\theta_2 - \tan^2\theta_2 + (\tan^2\theta_1 / \cos^2\theta_1))^{1/2}] \dots \dots \text{IV.20}$$

La capacidad liberada se torna en un ahorro económico para la compañía suministradora puesto que aplicar capacitores a líneas que se encuentren sobrecargadas es menos costoso que invertir para realizar las expansiones necesarias para desahogar al sistema.

IV.2.2.1.2 Reducción de pérdidas.

Dado que la corriente en una línea se reduce cuando se instala un capacitor en paralelo resulta obvio que las pérdidas por efecto Joule, I^2R , desde el punto de envío de la energía hasta el punto donde se localiza el capacitor, se verán disminuidas. La proporción de esta reducción solo contempla las pérdidas causadas por la componente reactiva de la corriente en la línea ya que la instalación del capacitor prácticamente no

afecta a la componente activa. Para demostrar esta afirmación consideremos las pérdidas I^2R antes de añadir el capacitor expresadas por la ecuación IV.21 :

$$I^2R = (I\cos\theta)^2R + (I\sin\theta)^2R \quad \dots \quad \text{IV.21}$$

al añadir el capacitor las nuevas pérdidas quedan expresadas como :

$$I_1^2R = (I\cos\theta)^2R + (I\sin\theta - I_c)^2R \quad \dots \quad \text{IV.22}$$

la reducción de pérdidas es :

$$P = I^2R - I_1^2R \quad \dots \quad \text{IV.23}$$

y por lo tanto :

$$P = 2(I\sin\theta)I_cR - I_c^2R \quad \dots \quad \text{IV.24}$$

IV.2.2.1.3 Incremento de la tensión.

Por efecto de la instalación de un capacitor se tiene, además de las anteriores consecuencias, un incremento de la tensión en el punto donde se coloca el capacitor lo que se traduce en una disminución de la caída de tensión en la línea. Si la caída en un alimentador de distribución puede aproximarse por :

$$CT = RI_R + XI_X \quad \dots \quad \text{IV.25}$$

entonces la caída resultante con un capacitor conectado a la línea es :

$$CT = R I_R + X_L I_x - X_C I_c \quad \dots \quad IV.26$$

donde:

CT - Caída de tensión, en volts

R - Resistencia por fase del alimentador

X_L - Reactancia inductiva por fase del alimentador

X_C - Reactancia capacitiva

I_R - Componente real de la corriente, en amperes

I_x - Componente reactiva inductiva de la corriente, en amperes

I_c - Componente reactiva capacitiva de la corriente, en amperes

Entonces haciendo I_c en IV.26 lo suficientemente grande se podría anular las caídas en la resistencia y la reactancia inductiva. Aplicando este principio a un alimentador de distribución se puede mejorar el nivel de tensión, sin embargo, la regulación de tensión en el alimentador no se mejora ya que el efecto del capacitor es unicamente de incremento de la tensión. Para que un capacitor en paralelo pudiera ser usado con fines de regulación es necesario dotarlo de un equipo que le permita conectarse y desconectarse del circuito, según las condiciones de carga. Esta forma de regulación presenta algunas desventajas ya que el nivel de incremento de la tensión dado por el capacitor puede ser más alto que el nivel de tensión máximo permisible, sobre todo cuando se tienen condiciones de carga mínima.

Existe una expresión aproximada que permite conocer el porcentaje de incremento de tensión provocado por la instalación de un banco de capacitores en un alimentador radial. Este porcentaje debe sobreponerse a la caída causada por la carga para obtener el incremento de tensión o caída neto. Esta expresión es:

$$\% \text{ INC. TENSION} = \frac{(kVAR)(d)(X)}{10 (kV^2)} \quad \dots \quad IV.27$$

donde:

- KVAR - Kilovars totales del banco de capacitores trifásico
- d - Distancia en km de la subestación al banco de capacitores
- X - Reactancia del alimentador en Ω/km
- kV - Kilovolts entre fases del sistema

Con esta misma expresión se determina la capacidad de un banco de capacitores necesaria para obtener un incremento de tensión deseado a una distancia d de la subestación.

IV.2.2.2 Tipos de instalación de capacitores en paralelo.

De acuerdo a la forma en que se instala un capacitor en paralelo se clasifican en 2 tipos :

- a) Capacitores fijos.
- b) Capacitores desconectables.

Por razones comerciales los capacitores se fabrican en capacidades determinadas por el fabricante, es por esto que en muchas ocasiones es necesario agrupar varias unidades hasta obtener el valor deseado. A estos arreglos se les denomina bancos de capacitores.

IV.2.2.2.1 Bancos de capacitores fijos.

Los capacitores fijos se encuentran permanentemente conectados al sistema, su único medio de desconexión son los cortacircuito fusible con que cuentan para su protección. El objetivo de este tipo de instalación es proporcionar un valor de potencia reactiva constante que demanda el sistema y a la

vez un incremento constante de tensión en el lugar donde se localizan, independiente de la condición de carga del alimentador. La figura IV.24 muestra el perfil de tensión típico de un alimentador antes y después de la aplicación de un banco de capacitores fijo.

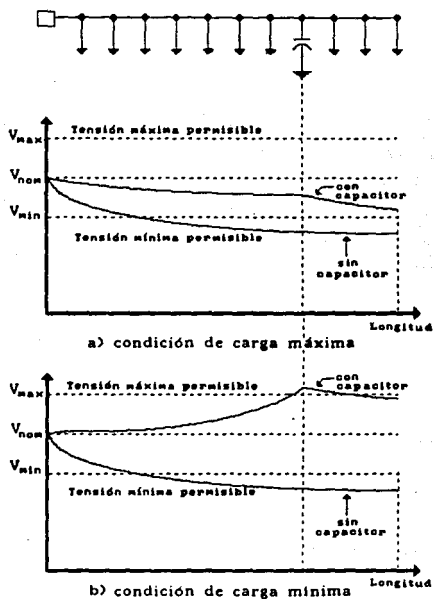


Figura IV.24

Un capacitor fijo tiende a reducir el gradiente de tensión en el alimentador, es decir, la relación entre la tensión al final de este y la tensión en el bus de la subestación bajo

carga máxima se acerca más a la unidad, siempre y cuando el banco de capacitores se encuentre bien ubicado. Y si además bajo carga mínima el incremento de tensión no es mayor que la tensión máxima permisible en algunos casos esto es suficiente para que la utilización de un regulador de tensión no sea necesaria.

IV.2.2.2 Bancos de capacitores desconectables.

Un capacitor desconectable cuenta con un medio que le permite ser incluido o separado del sistema cuando este lo requiera. Cuando se instala un capacitor de este tipo en un alimentador se tiene la ventaja de que bajo condición de carga mínima el capacitor se desconecta de la línea, evitando así que se pueda presentar una tensión mayor de la permisible y bajo condición de carga máxima los capacitores se conectan a la línea para que el aumento de tensión que producen mantenga la tensión dentro del rango de operación.

Un banco de capacitores desconectable que cuenta con un sistema de control automático para su conexión y desconexión se puede utilizar como un regulador de tensión pero, el ajuste de tensión que se obtiene no es fino ya que al contrario de un regulador de tensión del tipo autotransformador, que puede elevar la tensión en pequeños pasos, un banco de capacitores solo tiene normalmente un paso; se recomienda que la magnitud del cambio de tensión en una línea por operación de un banco de capacitores no exceda valores entre 2 % y 5 % para bancos que operen de 2 a 5 veces por día. La limitación en el número de operaciones que puede tener un banco esta dada en función del elemento interruptor debido a que si se tienen demasiadas operaciones requerirá de mayor mantenimiento y su vida útil disminuye considerablemente.

IV.2.2.2.1 Controles automáticos para bancos de capacitores desconectables.

El propósito de la utilización de un control automático en un banco desconectable es el de proveer al banco con un sistema que sea capaz de decidir, en base a las señales que se le alimenten, cuando se debe conectar y desconectar evitando de esta manera la operación manual. El sistema de control está formado por 4 partes: Elementos sensores, un elemento "inteligente" o lógica de control, interruptor, y fuente de alimentación. Los tipos de control disponibles actualmente son:

- A) Control por tiempo.
- B) Control por tensión.
- C) Control por corriente.
- D) Control por tiempo - tensión.
- E) Control por tensión - corriente.

Para la elección del tipo de control más indicado es necesario tomar en cuenta costo, localización del banco, curvas de carga diaria, y mantenimiento entre otros.

- A) Control por tiempo.

Este es el más común y barato en los sistemas de distribución además de ser el más simple. Esta formado por un reloj que mueve los contactos de disparo del interruptor. Solo conecta el banco a una hora determinada del día y lo desconecta después de transcurrir un tiempo prefijado en el reloj de control. Es necesario que cuente con un dispositivo mecánico que sea capaz de mantener funcionando el reloj cuando exista una falla en la fuente de alimentación, también debe estar provisto de un mecanismo que permita tener diferentes horas de disparo, según el día de la semana y temporada del año, para estar de acuerdo a la demanda.

Para la utilización de este control es necesario que el ciclo de carga del alimentador, donde se pretende instalar, sea conocido y consistente. Su principal problema es que si existe una condición adversa en el sistema al momento de conectar los capacitores, el control por tiempo es incapaz de reconocerlo y esto puede traer como consecuencia el agravamiento de las condiciones del sistema y posible daño al equipo.

B) Control por tensión.

El control por tensión mostrado en la figura IV.25 basa su operación en las variaciones de tensión que se producen por cambios en las condiciones de carga. El mecanismo está formado por un relevador de regulación de tensión y un relevador de retardo de tiempo, del tipo disco de inducción. El primero se encarga de ordenar el disparo del interruptor de acuerdo a un ancho de banda en las variaciones de tensión, el ancho de banda depende de que equipos de regulación de tensión se encuentren en el alimentador, y por lo general es más grande que el de los reguladores por autotransformador. El relevador de retardo de tiempo se activa con el de tensión y su función es la de retardar la orden de operación al interruptor para evitar falsas operaciones por disturbios momentáneos.

C) Control por corriente.

La corriente demandada por la carga es otra señal que se utiliza para la operación de un banco desconectable. Este control envía una señal al interruptor para que cierre sus contactos cuando detecta que la corriente excede de un valor predeterminado y en igual forma cuando la corriente es menor que un cierto límite ordena la apertura del interruptor. En forma similar al control por tensión, el control por corriente cuenta con dos relevadores uno para el ancho de banda de la corriente, que recibe su señal de un transformador de corriente localizado del lado de la carga del banco de capacitores, y otro para dar un retardo de tiempo una vez que se ha activado el de corriente. El esquema de control se ve en la fig. IV.26.

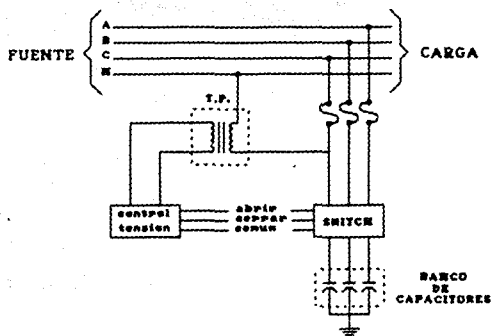


Figura IV.25

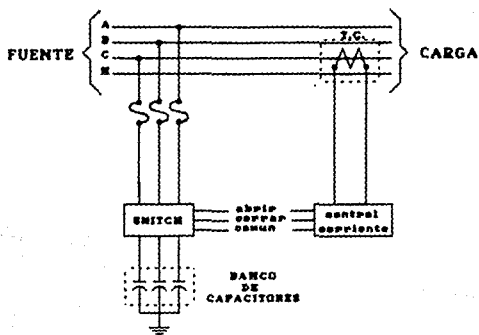


Figura IV.26

D) Control por tiempo - tensión.

Este control es una combinación de los dos tipos anteriores. Se utilizan en alimentadores donde se llegan a presentar condiciones inusuales de carga por periodos aleatorios de tiempo, pero que en general tienen un comportamiento de carga conocido. El control por tiempo actúa en la forma ya descrita, y es este control el que sigue al comportamiento conocido de carga. El control por tensión entra en función cuando se presentan los periodos inusuales de carga; al detectar una tensión fuera del ancho de banda del relevador de tensión el control por tensión pasa al control por tiempo y ordena la apertura o cierre del interruptor según el caso. La adición del control por tensión en este esquema de control garantiza un mínimo de operaciones del banco de capacitores, y además que los capacitores siempre estarán conectados cuando sean necesarios y desconectados cuando no lo sean.

E) Control por tensión - corriente.

La figura IV.27 representa un esquema de este tipo de control. La corriente en el secundario del transformador colocado del lado de carga del banco se hace circular a través de una resistencia que se encuentra en serie con la bobina del secundario del transformador de potencial, y por lo tanto la tensión en el relevador de operación del interruptor es igual a la tensión en la bobina menos la tensión en la resistencia, de tal forma que cuando la carga en el alimentador aumenta, la tensión en la bobina secundaria del T.P. disminuye y la tensión en resistencia aumenta, debido al incremento en la corriente de línea, por lo que la tensión en el relevador se hace más negativa que bajo condiciones normales y el relevador de operación tiende a girar en un sentido hacia el contacto de cierre del interruptor. Por el contrario cuando la tensión aumenta el relevador de operación tiende a girar en sentido inverso hacia el contacto de apertura del interruptor.

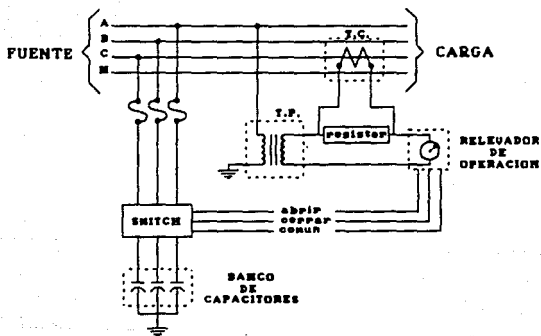


figura IV.27

IV.2.2.3 Aplicaciones de bancos de capacitores en paralelo.

En general un banco de capacitores en paralelo se utiliza para suministrar la potencia reactiva demandada por la carga. Bajo esta consideración las compañías eléctricas han determinado la forma en la que se utilizan los capacitores fijos y desconectables. La figura IV.28 muestra una curva típica del flujo de potencia reactiva en un alimentador con carga residencial y comercial.

Se observa que en la base de la curva existe un valor de potencia reactiva demandada que es constante durante el ciclo de 24 horas y que por encima de este valor se tienen

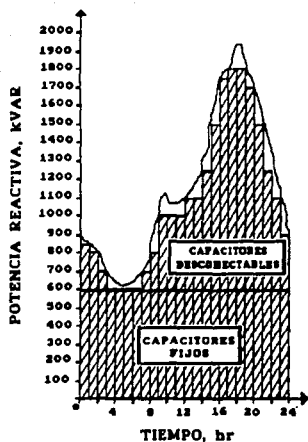


Figura IV.28

variaciones significativas de la potencia reactiva, llegando hasta un valor pico. Entonces, para suministrar el valor constante demandado, se utilizan capacitores fijos y para cubrir las variaciones se usan capacitores desconectables.

Algunas consideraciones que se deben tomar en cuenta al aplicar ambos tipos de capacitores son: al utilizar capacitores fijos es necesario determinar la carga mínima en el alimentador para poder establecer cual es el valor máximo en kVAR del banco de capacitores que se puede instalar sin que se rebase la tensión máxima permisible del alimentador.

Por lo que respecta a los capacitores desconectables la

capacidad en kVAR que se debe agregar para cubrir los picos de carga se obtiene mediante la siguiente relación empírica :

$$\frac{\text{kVAR capacit. desconec.} + \text{kVAR capacit. fijos}}{\text{kVAR pico demandados por el alimentador}} > 0.70 \quad \dots \quad \text{IV.28}$$

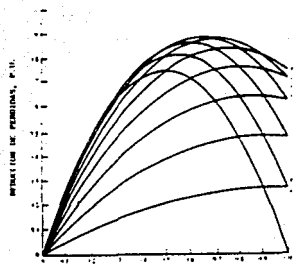
Si la instalación de más de un banco de capacitores fuera necesaria, la capacidad de cada banco en cada zona de influencia debe tener la misma proporción, esto es :

$$\frac{\text{kVAR del centro de carga}}{\text{kVAR del alimentador}} = \frac{\text{kVA del centro de carga}}{\text{kVA del alimentador}} \quad \dots \quad \text{IV.29}$$

IV.2.2.4 Localización de bancos de capacitores en paralelo.

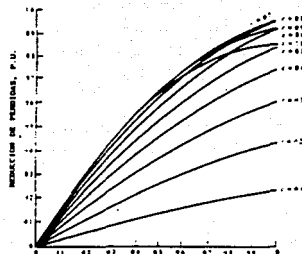
La mejor localización para un banco de capacitores en paralelo esta en relación directa con el punto en que se optimizan las pérdidas y la regulación de tensión. Para obtener este punto es necesario modelar el alimentador y aplicar un procedimiento matemático que permita determinar la distancia óptima, en relación con las pérdidas. Las siguientes gráficas IV.29, 30, 31, 32 y 33 son el resultado de la aplicación de los métodos desarrollados por Neagle, Samson y Chang considerando carga concentrada, carga uniformemente distribuida a lo largo del alimentador, combinaciones entre estas, y calibre constante en el segmento de línea considerado.

Este método considera como segmento de línea a el que se encuentra entre dispositivos seccionalizadores, reguladores de tensión, u otros puntos significativos de un alimentador. En caso de que un solo banco de capacitores no sea suficiente para minimizar las pérdidas hasta el valor deseado, se propone un nuevo banco y se repite el procedimiento considerando el banco anteriormente localizado.



LOCALIZACIÓN DEL CAPACITOR, P.U.

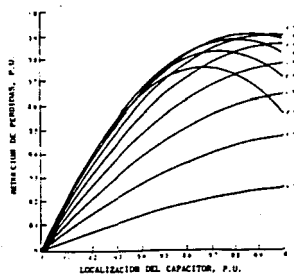
LÍNEA CON CARGA UNIFORMEMENTE
DISTRIBUIDA, ($\lambda = 0$).



LOCALIZACIÓN DEL CAPACITOR, P.U.

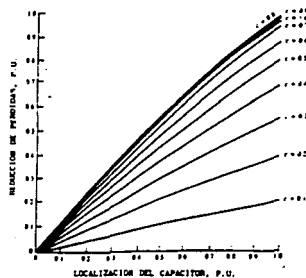
LÍNEA CON COMBINACIÓN DE CARGAS CONCENTRADAS
Y CARGAS UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDAS, ($\lambda = 1/2$).

Figuras IV.29 y IV.30



LOCALIZACIÓN DEL CAPACITOR, P.U.

LÍNEA CON COMBINACIÓN DE CARGAS CONCENTRADAS
Y CARGAS UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDAS, ($\lambda = 1/4$).



LOCALIZACIÓN DEL CAPACITOR, P.U.

LÍNEA CON COMBINACIÓN DE CARGAS CONCENTRADAS
Y CARGAS UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDAS, ($\lambda = 3/4$).

Figuras IV.31 y IV.32

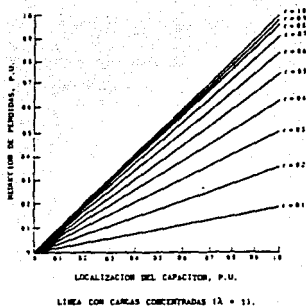


figura IV.33

donde c y λ se definen como:

$$c = \frac{\text{kVA del banco instalado}}{\text{carga reactiva total}} \quad \dots \quad \text{IV.30}$$

$$\lambda = \frac{\text{corriente reactiva al final del segmento de línea}}{\text{corriente reactiva al inicio del segmento de la línea}} \quad \dots \quad \text{IV.31}$$

Una vez que se obtiene la distancia óptima con respecto a las pérdidas es necesario analizar el punto de colocación encontrado con respecto a la regulación de tensión, lo que se hace utilizando la ecuación IV.27 y los perfiles de tensión del alimentador.

El procedimiento descrito anteriormente es fácil de aplicar bajo las consideraciones de alimentadores con carga concentrada y/o carga uniformemente distribuida pero, en la práctica, es difícil encontrar alimentadores que se ajusten a

estas características. Esto hace necesario contar con otro criterio que nos oriente sobre donde localizar un banco de capacitores en una línea con carga no uniformemente distribuida y calibre variable.

El siguiente método fue desarrollado por M. Maxwell y consiste en evaluar las pérdidas totales de potencia sumando las pérdidas entre cada par de nodos del alimentador. El banco de capacitores se debe colocar como primera aproximación en el nodo extremo y calcular las pérdidas totales, luego se coloca el banco de capacitores en el nodo anterior y se determinan nuevamente las pérdidas totales y así sucesivamente hasta conocer todos los valores de pérdidas con el banco de capacitores en cada nodo posible, por lo que al terminar el proceso se conoce el nodo exacto donde al instalar el banco de capacitores se obtiene la mejor reducción de pérdidas.

La ecuación desarrollada por este método para un alimentador con n segmentos es :

$$RP = (3R_1(2I_1 I_{c1} - I_{c1}^2) + 3R_2(2I_2 I_{c2} - I_{c2}^2) + \dots + 3R_n(2I_n I_{cn} - I_{cn}^2) \dots \quad \text{IV.32}$$

donde:

RP - Reducción de pérdidas de potencia al insertar capacitores

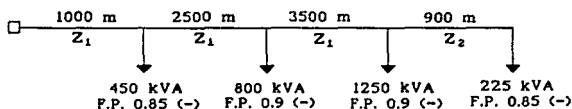
R_n - Resistencia óhmica del segmento n

I_n - corriente inductiva durante la demanda máxima, en el segmento n

I_{cn} - corriente capacitiva en el segmento n

Usando la ecuación general anterior, es posible desarrollar un algoritmo para computador que simplifique el proceso de cálculo cuando el número de nodos de un alimentador es grande; por esta razón este método será utilizado en la solución de la aplicación del capítulo V.

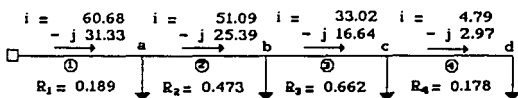
Con el fin de mostrar el desarrollo del método se presenta el siguiente ejemplo del cálculo de la reducción de pérdidas óptima, al insertar un banco de capacitores de 500 kVAR, en un alimentador con 4 nodos, tensión entre fases de 23 kV, y con las demandas máximas mostradas en la figura:



$$Z_1 = 0.189 + j 0.3867 \ \Omega/\text{km}$$

$$Z_2 = 0.198 + j 0.3844 \ \Omega/\text{km}$$

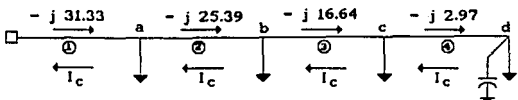
Con los datos proporcionados se obtiene la corriente en cada tramo del alimentador y su resistencia. El esquema con corrientes queda en la forma siguiente:



La corriente del banco de capacitores es:

$$I_c = \frac{500}{\sqrt{3} \times 23} = j 12.55 \text{ A.}$$

De acuerdo con el método el primer paso es colocar el banco de capacitores en el nodo extremo:



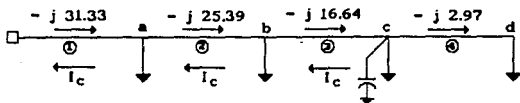
En este caso el nodo d es el nodo extremo y ahora es necesario calcular la reducción de pérdidas según la ecuación IV.32. Para el nodo d la expresión queda:

$$RP_d = 3R_1 (2I_1I_{c1} - I_{c1}^2) + 3R_2 (2I_2I_{c2} - I_{c2}^2) + \\ 3R_3 (2I_3I_{c3} - I_{c3}^2) + 3R_4 (2I_4I_{c4} - I_{c4}^2)$$

$$RP_d = 3 \times 0.189 (2 \times 31.33 \times 12.55 - 12.55^2) + \\ 3 \times 0.473 (2 \times 25.39 \times 12.55 - 12.55^2) + \\ 3 \times 0.662 (2 \times 16.64 \times 12.55 - 12.55^2) + \\ 3 \times 0.178 (2 \times 2.97 \times 12.55 - 12.55^2)$$

$$RP_d = 356.57 + 680.81 + 516.68 - 44.30 = 1509.76 \text{ W}$$

El siguiente paso es colocar el banco de capacitores en el nodo c:

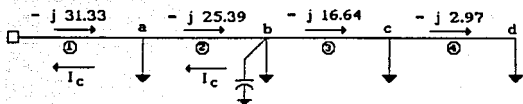


La corriente capacitiva en el segmento 4 es igual a cero por lo que la expresión IV.32 se reduce a:

$$RP_c = 3R_1 (2I_1I_{c1} - I_{c1}^2) + 3R_2 (2I_2I_{c2} - I_{c2}^2) + \\ 3R_3 (2I_3I_{c3} - I_{c3}^2)$$

$$RP_c = 356.57 + 680.81 + 516.68 = 1554.06 \text{ W}$$

Para el nodo b:

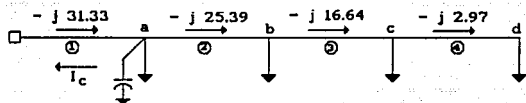


$$I_{c4} = I_{c3} = 0$$

$$RP_b = 3R_1 (2I_1 I_{c1} - I_{c1}^2) + 3R_2 (2I_2 I_{c2} - I_{c2}^2)$$

$$RP_b = 356.57 + 680.81 = 1037.38 \text{ W}$$

Finalmente con el banco en el nodo a:



$$I_{c4} = I_{c3} = I_{c2} = 0$$

$$RP_a = 3R_1 (2I_1 I_{c1} - I_{c1}^2)$$

$$RP_a = 356.57 = 356.57 \text{ W}$$

Resumiendo:

CAPACITORES EN NODO	REDUCCION DE PERDIDAS WATTS
a	356.57
b	1037.38
c	1554.06
d	1509.76

La tabla presentada en la hoja anterior muestra que el nodo óptimo, donde se tiene la mayor reducción de pérdidas de potencia, para la instalación del banco de capacitores es el nodo c.

IV.2.2.5 Conexión de bancos de capacitores.

Los bancos de capacitores se conectan en tres diferentes formas: Delta, estrella no aterrizada, y estrella aterrizada. La conexión dependerá del tipo de sistema en que se van a instalar, consideraciones sobre protección, localización del banco, e interferencia a líneas telefónicas. Usualmente se utilizan bancos en delta para sistemas delta o no aterrizados, bancos en estrella aterrizada para sistemas de 4 hilos y bancos en estrella aterrizada o no aterrizada para bancos en subestaciones.

Los bancos conectados en delta o estrella no aterrizada tienen siempre la posibilidad de entrar en resonancia cuando una o dos fases del lado de la fuente se encuentran abiertas, por lo que se recomienda no utilizarlos en alimentadores que tengan interruptores de operación monopolar.

IV.2.2.6 Bancos de capacitores en paralelo en subestaciones.

Un banco de capacitores da el máximo beneficio económico mientras más cerca se encuentre de la carga. Como ya se ha visto para cumplir esta condición se instalan bancos montados sobre postes a lo largo de los alimentadores, pero, frecuentemente también se instalan en subestaciones, respondiendo a necesidades especiales. Algunas de estas situaciones pueden ser:

- a) Una carga grande alimentada directamente de la subestación.
- b) Ya no es posible la instalación de mas bancos sobre los alimentadores.
- c) El sistema requiere más capacitores en un área de los que económicamente se pueden instalar sobre los alimentadores.
- d) El sistema requiere de un bloque de capacitores grande en una área específica bajo el control del despachador del sistema.

Los bancos situados en subestaciones son de capacidades grandes y están formados por grupos de capacitores para poder dar los incrementos de potencia reactiva requerida, en forma escalonada, y evitar la necesidad de instalar un interruptor de gran capacidad para todo el banco, de manera que cada sección del banco tiene un interruptor de mediana capacidad. Estos bancos se encuentran siempre controlados directamente por un despachador o un control automático.

IV.3 Incremento en el calibre del alimentador

Al incrementar el calibre del conductor en el alimentador (su área transversal) disminuye la impedancia del mismo y por lo tanto se obtiene una caída de tensión menor y una mejor regulación de tensión, según las relaciones estudiadas en el capítulo II.

El cambiar el calibre del alimentador para corregir un problema de regulación es una de las soluciones más costosas y solamente se justificara donde la carga halla crecido demasiado y no exista posibilidad de nuevos alimentadores o cambio de

tensión. Las consideraciones sobre el calibre del conductor deben hacerse cuidadosamente durante la planeación del sistema, tomando en cuenta regulación de tensión, pérdidas y costos de los conductores para evitar en la medida de lo posible cambios de conductor en alimentadores ya instalados.

IV.4 Incremento del nivel de tensión

Un incremento del nivel de tensión provoca que para la misma carga la corriente se reduzca, por lo que la caída de tensión disminuye y se mejora la regulación de tensión, además de reducir las pérdidas. La corriente cambia en una relación inversa al cambio de tensión y la caída de tensión mejora en relación al cuadrado del cambio de tensión. Este también es un método caro para corregir regulación de tensión ya que implica el cambio de todo el equipo del alimentador, excepto posterior y conductores, así como de la modificación de la subestación. Una decisión de cambio de tensión se da cuando se reúnen varias condiciones como el crecimiento excesivo de la carga, expansión del sistema y del propio alimentador, normalización de tensiones de un sistema y posibilidades económicas.

IV.5 Transferencia de carga a otro alimentador

Al disminuir la carga de un alimentador, disminuye la corriente que por él circula y por lo tanto disminuye la caída de tensión y mejora la regulación. Esta transferencia puede efectuarse a un alimentador cercano ya existente que tenga capacidad sobrada o a un alimentador nuevo, ya sea de la misma subestación o de otra cercana o nueva. Es muy importante considerar esta posibilidad antes de tratar de corregir problemas de regulación en alimentadores aislados. En sistemas con múltiples subestaciones como el de la Ciudad de México es muy probable que una reconfiguración de los alimentadores de

determinada zona corrija los problemas de regulación. En general, es mejor buscar soluciones en bloque a problemas de regulación, pérdidas, sobrecargas y expansión en una zona considerable en la que reconfiguraciones de alimentadores, construcción de nuevas subestaciones, cambios en el nivel de tensión, etc., puedan ser contemplados en conjunto durante una etapa de planeación.

V.- EJEMPLOS DE APLICACION

V.1 Introducción

El siguiente capítulo tiene como finalidad ejemplificar la aplicación de los distintos métodos anteriormente desarrollados en alimentadores reales que presentan problemas de regulación, así como realizar una evaluación tanto técnica como económica de los mismos que permita decidir cual será la solución más eficiente en estos casos y otros que presenten características similares.

Para los fines descritos se seleccionaron dos alimentadores que presentan las siguientes características: Son alimentadores en los que ya se han detectado problemas de regulación. Son alimentadores en 23 kV típicos de la periferia de la Ciudad de México que originalmente eran rurales (con secciones en 6 kV) y a los que se han ido sumando cargas aceleradamente y; por último, son alimentadores de longitud considerable.

V.2 Definición del problema

Los alimentadores seleccionados son el CHA-21 y el CHA-23, ambos de la subestación Chalco y conectados al mismo banco de transformación. Para aplicar las soluciones es necesario conocer detalladamente las características de los alimentadores, de manera que sea posible desarrollar un modelo del alimentador lo más apegado a la realidad. Las fuentes de información para obtener los datos necesarios para el modelo son:

- Planos de los alimentadores, de los cuales se obtiene la ubicación de las cargas, las longitudes de los tramos de

alimentador entre cada carga o grupo de cargas y el calibre del alimentador en sus distintas secciones.

- Tableros de operación, en donde se comprueba que las cargas indicadas en los planos continúen conectadas a los alimentadores en estudio, y que el alimentador no halla sufrido una modificación reciente en su trayectoria. En caso de sí existir una modificación importante, como fué el caso del alimentador CHA-21, es necesario redibujar el plano basándose en un plano general de la zona.
- Listados generados hora por hora en la subestación, de los que se obtienen los valores de demanda máxima y mínima de corriente para cada alimentador; los valores de potencia real y reactiva demandadas al banco, con las que se pudo estimar el factor de potencia de las cargas; y el valor de tensión en el bus. Como los dos alimentadores tienen conectadas subestaciones 23/6, es necesario también obtener valores de demanda máxima y mínima para estas subestaciones de los listados respectivos.
- Listados de servicios en mediana tensión por nombres o por ubicación, ya que en los planos estos servicios únicamente aparecen indicados sin mencionar que carga tienen instalada.

Con los datos antes descritos se desarrollaron los modelos que aparecen en las figuras V.1 y V.3 y que sirvieron de base para la aplicación de las soluciones.

Para obtener los valores de caída de tensión y los perfiles de tensión correspondientes a cada alimentador se creó un nuevo programa de cómputo que utiliza un mayor número de datos que el programa desarrollado en el capítulo III, y con el que se obtiene una estimación más precisa. El nuevo programa

entrega como resultados, además de la caída total del alimentador, los valores de corriente real y reactiva en cada tramo del alimentador, la caída también en cada tramo y el valor de tensión al final de cada tramo, con lo que es posible trazar el perfil de tensión. Se incluyen también rutinas para la localización de capacitores en paralelo y el cálculo de los perfiles resultantes de la aplicación de capacitores, según los métodos descritos en los capítulos IV.2 y V.4.

El programa requiere como datos de entrada, además de la longitud de cada tramo y la carga instalada al final de este, el calibre del conductor en cada tramo, las potencias real y reactiva de las cargas y el factor de potencia del alimentador. Cabe aclarar que aunque el cálculo desarrollado es bastante aproximado, lo ideal sería contar con un perfil de tensión cuyos valores se hubieran obtenido a partir de medición directa en el alimentador a las horas de demanda máxima y mínima.

Los resultados obtenidos, que se reportan en las tablas V.1, V.2, V.3 y V.4, indican que los alimentadores tienen caídas de tensión superiores a las recomendables:

Alimentador	Caída de Tensión	% de caída	Caída en base de 127 V.
CHA-21	1,575.9 V	6.85 %	8.7 V
CHA-23	1,783.9 V	7.76 %	9.8 V

Según la recomendación utilizada en este trabajo la caída en el alimentador no debe exceder los 3.5 V en base de 127 V, es decir, 633.86 V en alimentadores de 23 kV. Restando este valor a la tensión nominal, tenemos que la tensión mínima permisible es 22,366 V. El límite superior para la tensión queda definido por los límites de zona favorable mencionados en el capítulo III, es decir, 3% por arriba de la tensión nominal, lo que nos da una tensión máxima permisible de 23,690 V. De

esta manera el rango de tensiones en que se considera que el alimentador está trabajando adecuadamente será de 22,366 hasta 23,690 V, con un ancho de banda del sistema de 1.32 kV.

En la subestación se cuenta con bus regulado, que aunque no es suficiente para corregir el problema, debe ser aprovechado para desarrollar las soluciones. Además debe tomarse en cuenta que los dos alimentadores están conectados al mismo bus, por lo que si se decide elevar la tensión del bus por encima de la nominal, el valor seleccionado debe ser adecuado para los dos alimentadores.

En las siguientes páginas se muestran los modelos de los alimentadores, el programa de cálculo, los resultados del mismo y los perfiles de tensión de los alimentadores en las condiciones en que se encuentran actualmente.

PROGRAMA DE CALCULO

RUTINA DE LECTURA DE DATOS

```

5 dim l(50),s(50),p(50),q(50),ce(50),tc(50)
10 print"HM":print
20 input" nombre y subestacion del alimentador"n$:print
30 input" demanda maxima ( amp )"im:print
40 input" numero de tramos"nt:print
50 input" factor de potencia"fp:print
60 for j=1 to nt
70 : print" longitud del tramo "j$:
80 : input l(j)
90 : print" cable 1(ald336) o 2(acsr4/0)"$:
100 : input tc(j)
110 : print" carga real conocida (s/n)"$:
120 : input as
121 : if as="s" then ce(j)=1
130 : if ce(j)=1 then begin
140 : input" p real"jp(j)
150 : input" q real"jq(j)
170 : bend
180 : print" carga instalada "j$:
190 : input s(j):print
210 next j
230 dopenfi,"@prueba",w
240 printfi,n$:
250 printfi,im
260 printfi,nt
270 printfi,fp
280 for j=1 to nt
290 : printfi,l(j)
291 : printfi,tc(j)
292 : printfi,ce(j)
293 : if ce(j)=1 then begin
294 : printfi,p(j)
295 : printfi,q(j)
296 : bend
300 : printfi,s(j)
310 next j
320 dclosefi
330 end

```

CALCULO DE CAIDA DE TENSION Y LOCALIZACION DE CAPACITORES

```

20 rem
70 rem l(n) - longitud del tramo n del alimentador en metros
80 rem tc(j) - tipo de cable en el tramo j ( 1=ald336, 2=acsr4/0 )
90 rem s(j) - carga trifasica instalada j en kva
100 rem p(j) - potencia real de demanda maxima j en kw

```

```

110 rem q(j) - potencia reactiva de demanda maxima j en kvar
120 rem ca(j) - bandera de carga conocida
130 rem i(j) - corriente de fase que demanda la carga s(j)
135 rem ir(j) e ii(j) - corrientes real y reactiva en el tramo j
140 rem ct(j) - caida de tension en el tramo j
150 rem vr(j) y vi(j) - componentes real e imaginaria de la caida en
j
160 rem ct - caida de tension total en el alimentador
170 rem nt - numero de tramos
180 rem fu - factor de utilizacion
190 rem im - corriente maxima medida en el alimentador
200 rem sa - carga maxima que demanda el alimentador
210 rem si - capacidad instalada ( suma de todos los transformadores
23/220 )
220 rem fp - factor de potencia
230 rem
240 b1=0.189 : rem resistencia del cable del alimentador en ohms/km
(1)
250 c1=0.3867 : rem reactancia del cable del alimentador en ohms/km
(1)
260 b2=0.364 : rem resistencia del cable del alimentador en ohms/km
(2)
270 c2=0.3804 : rem reactancia del cable del alimentador en ohms/km
(2)
280 vn=23 : rem tension nominal del sistema en kv
290 rem
300 ii=0:it=0:cr=0:ci=0:si=0:lt=0:ca=0:sa=0
310 dim l(50),tc(50),s(50),p(50),q(50),i(50),ce(50),ct(50)
315 dim ir(50),ii(50),vr(50),vi(50)
316 dim
nn(10),ck(10),ix(50),iz(50),pe(50),rp(50),rt(50),ad(50),ae(50),af(50)
320 dopenh1,"prueba"
330 inputh1,ns
340 inputh1,im
350 inputh1,nt
360 inputh1,fp
370 for j=1 to nt
380 : inputh1,l(j):print
390 : print" longitud del tramo ";j;" =";l(j)
400 : inputh1,tc(j):print
410 : print" tipo de cable";tc(j)
420 : inputh1,ce(j):print
430 : print" carga especial";ce(j)
440 : if ce(j)=1 then begin
450 : inputh1,p(j):print
460 : print" p=";p(j)
470 : inputh1,q(j):print
480 : print" q=";q(j)
490 : bend
500 : inputh1,s(j):print
510 : print" carga ";j;" =";s(j)
520 next j
530 dcloseh1:ce(23)=0:rem im=190
540 for j=1 to nt
550 : if ce(j)<>1 then begin

```

```

552 :      si=si+s(j)
553 : bend:else begin
555 :      s(j)=sqr((p(j)^2)+(q(j)^2))
556 :      sa=sa+s(j)
557 : bend
560 :      lt=lt+1(j)
570 next j
580 sm=(sqr(3)*vn*im)-sa
590 fu=sm/si
600 for j=1 to nt
610 :   if ce(j)=1 then begin
625 :       i(j)=s(j)/(1.732*vn)
630 :   bend: else begin
640 :       i(j)=(s(j)*fu)/(1.732*vn)
645 :   bend
660 next j
665 if fp=1 then ap=0
670 if fp(<)1 then ap=-atn(fp/sqr(-fp*fp+1))+
680 for j=1 to nt
690 :   ir=0:ii=0
700 :   for k=j to nt
710 :       if ce(k)=1 then begin
720 :           ac=atn(q(k)/p(k))
730 :           ri=i(k)*cos(ac)
740 :           ii=i(k)*sin(ac)
750 :       bend:else begin
760 :           ri=i(k)*cos(ap)
770 :           ii=i(k)*sin(ap)
780 :       bend
790 :       ir=ir+ri
800 :       ii=ii+ii
810 :       if j=1 then it=sqr(ir^2+ii^2)
820 :   next k
825 :   ir(j)=ir:ii(j)=ii
830 :   ri=ir#1(j)
840 :   ii=ii#1(j)
850 :   if tc(j)=1 then begin
860 :       r2=b1/1000:i2=c1/1000
870 :   bend:else begin
880 :       r2=b2/1000:i2=c2/1000
890 :   bend
900 :   gosub 5000
910 :   vr(j)=r:vi(j)=i
950 :   ct(j)=sqr((vr(j)^2)+(vi(j)^2))
960 :   cr=cr+vr(j)
970 :   ci=ci+vi(j)
980 next j
990 ct=sqr((cr^2)+(ci^2)):print
1000 pc=ct/230
1010 cb=pc#127/100
1020 for j=1 to nt
1030 :   print"      caida "j;" "ct(j):print
1040 next j
1050 print"      caida total del alimentador = "ct;" v.":print
1060 input"      imprimir resultados (s/n)"ja%

```

```

1070 if as="s" then gosub 3000
1080 print:input"desea localizacion de capacitores ";ahs
1090 if ahs = "s" then 1110
1100 stop
1110 gosub 6000
1120 stop
3000 rem
3010 rem subrutina de impresion de resultados
3020 rem
3030 dopenf4,"salida",u4
3040 printf4,"          ";jn9:printf4
3050 printf4,"      demanda maxima ="|im|" amp."
3060 printf4,"      numero de tramos ="|nt
3070 printf4,"      factor de utilizacion ="|fu
3075 printf4,"      factor de potencia ="|fp
3090 printf4,"      longitud total del troncal ="|lt|" m":printf4
3100 printf4,"      tramo longitud s instalada      corriente
caida      tension"
3110 printf4,"          (m)          (kva)          (amp)
(v)          (kv)"
3120 for j=1 to nt
3125 : ca=ca+ct(j)
3130 : printf4,using"#####";j|
3140 : printf4,using"#####";l|j|
3145 : printf4,using"#####";s|j|
3150 : if ce(j)=1 then printf4,using"#####";l|j|
3152 : if ce(j)=0 then printf4,using"#####";l|j|
3153 : printf4,using" - ";j|l|j|
3155 : printf4,using"#####";l|j|
3157 : printf4,using"#####";jvn-(ca/1000)
3160 next j:printf4
3170 printf4,"      # carga conocida":printf4
3270 printf4:printf4," ##### caida total del alimentador ="|
3275 printf4,using"#####";l|ct|:printf4,"v"
3280 printf4:printf4,"          porcentaje de caida ="|
3285 printf4,using"#####";l|pci|:printf4,"%"
3290 printf4:printf4,"      caida en base de 127 volts ="|
3295 printf4,using"#####";l|cb|:printf4,"v"
3300 dcioseh4
3310 return
5000 rem
5010 rem subrutina de multiplicacion de numeros complejos
5020 rem
5030 m1=sqr((r1^2)+(i1^2))
5040 m2=sqr((r2^2)+(i2^2))
5050 a1=atn(i1/r1)
5060 a2=atn(i2/r2)
5070 m=m1*m2
5080 a=a1+a2
5090 r=m*cos(a)
5100 i=m*sin(a)
5110 return
5120 end
6000 rem subrutina de ubicacion de bancos de capacitores
6010 rem

```

```

6030 for j=1 to nt
6040 :   ii(j)=-ii(j)
6050 next j
6060 print:input "existen bancos de capacitores, (s/n) "jacs
6070 if acs = "n" then 6185
6080 print:input "cuantos bancos existen "jnb
6090 for i=1 to nb
6100 :   print:print"numero de nodo en que se localiza el banco "ji
6110 :   input" "inn(i)
6112 :   print:input"capacidad del banco (kvar) "jck(i)
6120 next i
6130 for i=1 to nb
6135 :   ic=cck(i)/(sqr(3)*23)
6140 :   for j=1 to nn(i)
6150 :       ix(j) = ic-abs(ii(j))
6160 :       ii(j) = ix(j)
6170 :   next j
6180 next i
6185 pr=sqr(3)*23*ii(1)
6190 print:input"capacidad del banco a instalar (kvar) "jck
6195 ic=cck/(sqr(3)*23)
6200 gosub 7000
6210 gosub 9000
6220 gosub 11000
6230 gosub 8000
6240 gosub 10000
6250 print:print"desea imprimir los datos del alimentador con el
banco "j
6260 input"de capacitores en el nodo seleccionado (s/n) "jags
6270 if ags="s" then 6290
6280 stop
6290 gosub 13000
6300 stop
6310 rem
6990 rem
7000 rem subrutina de calculo de perdidas antes de insertar
capacitores
7010 rem
7015 f = 0
7020 for j=1 to nt
7030 :   if tc(j) = 1 then begin
7040 :       pe(j) = (3*(b1*ii(j)/1000)*(ir(j)^2 + ii(j)^2))/1000
7050 :   bend:else begin
7060 :       pe(j) = (3*(b2*ii(j)/1000)*(ir(j)^2 + ii(j)^2))/1000
7070 :   bend
7080 :   f=f + pe(j)
7090 next j
7100 return
7990 rem
8000 rem subrutina de calculo de reduccion de perdidas al insertar
capacitores
8010 rem
8020 h=nt
8030 for k=nt to 1 step -1
8040 :   g=0

```

```

8050 :   for j=1 to h
8060 :       if tc(j) = 1 then begin
8070 :           rp(j) =
(3*(b1*1(j)/1000)*(abs(2*ii(j)*ic)-ic^2))/1000
8080 :           bend:else begin
8090 :               rp(j) =
(3*(b2*1(j)/1000)*(abs(2*ii(j)*ic)-ic^2))/1000
8100 :           bend
8110 :           ix(j) = ic-abs(ii(j))
8115 :           iz(j) = ii(j)
8120 :           ii(j) = ix(j)
8130 :           g = g + rp(j)
8140 :       next j
8150 :       h = h - 1
8160 :       rt(k) = g
8170 :       gosub 9000
8180 :       ad(k) = ct
8190 :       ae(k) = pc
8200 :       af(k) = cb
8210 :       for j=1 to nt
8220 :           ii(j) = iz(j)
8230 :       next j
8240 next k
8250 return
8990 rem
9000 rem subrutina de calculo de caida de tension ( por tramo y total
)
9010 rem
9015 cr=0 : ci=0
9020 for j=1 to nt
9030 :   r1=ir(j)*1(j)
9040 :   i1=ii(j)*1(j)
9050 :   if tc(j)=1 then begin
9060 :       r2=b1/1000:i2=c1/1000
9070 :   bend:else begin
9080 :       r2=b2/1000:i2=c2/1000
9090 :   bend
9100 :   gosub 5000
9110 :   vr(j)=r:i1=ii(j)=i
9120 :   ct(j)=sqr((vr(j)^2)+(vi(j)^2))
9130 :   cr=cr+vr(j)
9140 :   ci=ci+vi(j)
9150 next j
9160 ct=sqr((cr^2)+(ci^2))
9170 pc=ct/230
9180 cb=pc*127/100
9190 return
9990 rem
10000 rem subrutina de impresion de reducciones de perdidas
10010 rem
10020 dopen#4,"salida",u4 :print#4
10030 print#4,"          banco de capacitores      reduccion
% de caida"
10040 print#4,"          ( a instalar )      de
de"

```



```

10050 print#4,"          localizado en nodo          perdidas
      tension"
10070 print#4,"          (kw)
      (%)"
10080 for j=1 to nt
10090 :   print#4,using"#####j;"
10100 :   print#4,using"#####irt(j);"
10110 :   print#4,using"#####iae(j)"
10120 next j
10130 dcloset#4
10140 return
10990 rem
11000 rem subrutina de impresion de condiciones antes de insertar
capacitores
11010 rem
11011 dopen#4,"salida",u4
11012 print#4,"          "in#:print#4
11013 print#4,"condicion actual del alimentador : "
11014 if ac#="s" then 11016
11015 goto 11020
11016 for i=1 to nb
11017 :   print#4: print#4," banco de capacitores de
":print#4,using"##### kvar "ick(i);print#4," instalado en el nodo =>
"inn(i)
11018 next i
11020 print#4:print#4:print#4," tramo longitud s instalada
corriente      perdidas      caida      tension"
11030 print#4,"          (v)          (kv)"
          (m)          (kva)          (amp)          (kw)
11035 ca=0
11040 for j=1 to nt
11050 :   ca=ca+ct(j)
11060 :   print#4,using"#####j;"
11070 :   print#4,using"#####i1(j);"
11080 :   print#4,using"#####is(j);"
11085 :   print#4,using"#####ir(j);"
11086 :   print#4,using"#####i j"i1(j);"
11090 :   if ce(j)=1 then print#4,using"#####ipe(j);"
11100 :   if ce(j)=0 then print#4,using"#####ipe(j);"
11120 :   print#4,using"#####ict(j);"
11130 :   print#4,using"#####ivn-(ca/1000)"
11140 next j:print#4
11150 print#4,"          * carga conocida"
11160 print#4:print#4,"          perdidas totales del
alimentador ="j
11170 print#4,using"#####j;":print#4," kw"
11172 print#4:print#4,"          potencia reactiva demandada por el
alimentador ="j
11173 print#4,using"#####ipr;":print#4," kvar"
11180 print#4:print#4,"          caida total del
alimentador ="j
11190 print#4,using"#####ict;":print#4," v"
11200 print#4:print#4,"          porcentaje de
caida ="j
11210 print#4,using"#####ipci;":print#4," %"

```

```

11220 print#4:print#4,"                          caida en base de 127
volts =";
11230 print#4,using"#.#.#.#.#"icb1:print#4," v"
11240 dclose#4
11250 return
11990 rem
12000 rem subrutina de impresion de condiciones con los capacitores
12010 rem
12011 dopen#4,"salida",u4
12020 print#4,"          "in#:print#4
12022 if ac#="s" then 12024
12023 goto 12030
12024 for i=1 to nb
12025 : print#4: print#4," banco de capacitores de
":print#4,using"#.#.#.#.# kvar "ick(i):print#4," instalado en el nodo =>
"inn(i)
12026 next i :print#4
12030 print#4," banco de capacitores (a instalar) de
":print#4,using"#.#.#.#.# kvar"ick:print#4," localizado en el nodo
=>"in1
12040 print#4,
12050 print#4," tramo longitud          corriente          reduccion de
perdidas caida          tension".
12060 print#4,"          (m)          (amp)          (kw)
(v)          (kv)"
12065 ca=0
12070 for j=1 to nt
12080 : ca=ca+ct(j)
12090 : print#4,using"#.#.#.#.#"j}
12100 : print#4,using"#.#.#.#.#"i1(j)}
12105 : print#4,using"#.#.#.#.#.#"i1r(j)}
12106 : print#4,using"#.#.#.#.#.#"j"}i1i(j)}
12110 : if ce1(j)=1 then print#4,using"#.#.#.#.#.#"irp(j)}
12120 : if ce1(j)=0 then print#4,using"#.#.#.#.#.#"irp(j)}
12130 : print#4,using"#.#.#.#.#.#"ict(j)}
12140 : print#4,using"#.#.#.#.#.#"ivn-(ca/1000)
12150 next j:print#4
12160 print#4," * carga conocida"
12162 print#4:print#4,"          perdidas totales del
alimentador ="
12164 print#4,using"#.#.#.#.#"i}f}:print#4," kw"
12170 print#4:print#4,"          reduccion de perdidas en el
alimentador ="
12180 print#4,using"#.#.#.#.#"igl:print#4," kw"
12182 print#4:print#4,"          potencia reactiva demandada por el
alimentador ="
12183 print#4,using"#.#.#.#.#.#"ipri:print#4," kvar"
12190 print#4:print#4,"          caida total del
alimentador ="
12200 print#4,using"#.#.#.#.#.#"ict:print#4," v"
12210 print#4:print#4,"          porcentaje de
caida ="
12220 print#4,using"#.#.#.#.#"ipci:print#4," %"
12230 print#4:print#4,"          caida en base de 127
volts =";

```

```
12240 print#4,using"###.###"icb:print#4," v"  
12250 dclose#4  
12260 return  
12990 rem  
13000 rem subrutina de calculo de condiciones con los capacitores  
13010 rem  
13020 print:input"numero de nodo donde se localizaria el banco "i;n1  
13025 g = 0  
13030 for j=1 to n1  
13040 : if tc(j) = 1 then begin  
13050 :   rp(j) = (3*(b1#1(j)/1000)*(abs(2#ii(j)#ic)-ic#2))/1000  
13060 :   bend:else begin  
13070 :     rp(j) = (3*(b2#1(j)/1000)*(abs(2#ii(j)#ic)-ic#2))/1000  
13080 :   bend  
13090 :   ix(j) = ic-abs(ii(j))  
13100 :   ii(j) = ix(j)  
13110 :   g = g + rp(j)  
13120 next j  
13130 pr=sqr(3)#23#ii(1)  
13140 gosub 7000  
13150 gosub 9000  
13160 gosub 12000  
13170 return
```

Subestación CHALCO
Alimentador CHA-21

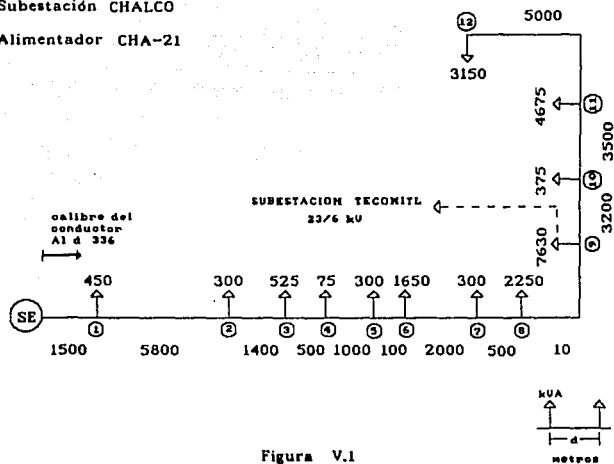


Figura V.1

CHA-21 Subestación Chalco

Demanda máxima = 260 amp.
 Número de tramos = 12
 Factor de utilización = .238988407
 Factor de potencia = .9333
 Longitud total del troncal = 24510 m

Tramo	Longitud (m)	S instalada (kVA)	Corriente (amp)	Caída (V)	Tensión (kV)
1	1500	450	242.67 - j 93.37	167.87	22.8321
2	5800	300	240.15 - j 92.40	642.35	22.1898
3	1400	525	238.47 - j 91.75	153.96	22.0358
4	500	75	235.53 - j 90.62	54.31	21.9815
5	1000	300	235.11 - j 90.46	108.43	21.8731
6	100	1650	233.43 - j 89.81	10.77	21.8623
7	2000	300	224.19 - j 86.26	206.78	21.6555
8	500	2250	222.51 - j 85.61	51.31	21.6042
9	10	7630 *	209.91 - j 80.76	0.97	21.6033
10	3200	375	45.91 - j 17.67	67.76	21.5355
11	3500	4675	43.81 - j 16.86	70.72	21.4648
12	5000	3150	17.64 - j 6.79	40.67	21.4241

* Carga conocida

**** Caída total del alimentador = 1575.981V

Porcentaje de caída = 6.85%

Caída en base de 127 volts = 8.7016V

Tabla V.1

CHA-21 Subestación Chalco

Demanda mínima = 100 amp.
 Número de tramos = 12
 Factor de utilización = .183750778
 Factor de potencia = .9333
 Longitud total del troncal = 24510 m

Tramo	Longitud (m)	S instalada (kVA)	Corriente (amp)	Calda (V)	Tensión (kV)
1	1500	450	93.33 - j 35.91	64.56	22.9354
2	5800	300	91.40 - j 35.17	244.47	22.6910
3	1400	525	90.10 - j 34.67	58.18	22.6328
4	500	75	87.84 - j 33.80	20.26	22.6125
5	1000	300	87.52 - j 33.67	40.36	22.5722
6	100	1650	86.23 - j 33.18	3.98	22.5682
7	2000	300	79.13 - j 30.44	72.98	22.4952
8	500	2250	77.83 - j 29.95	17.95	22.4773
9	10	7630	68.15 - j 26.22	0.31	22.4770
10	3200	375	35.30 - j 13.58	52.10	22.4249
11	3500	4675	33.69 - j 12.96	54.37	22.3705
12	5000	3150	13.56 - j 5.22	31.27	22.3392

* Carga conocida

***** Calda total del alimentador = 660.786V

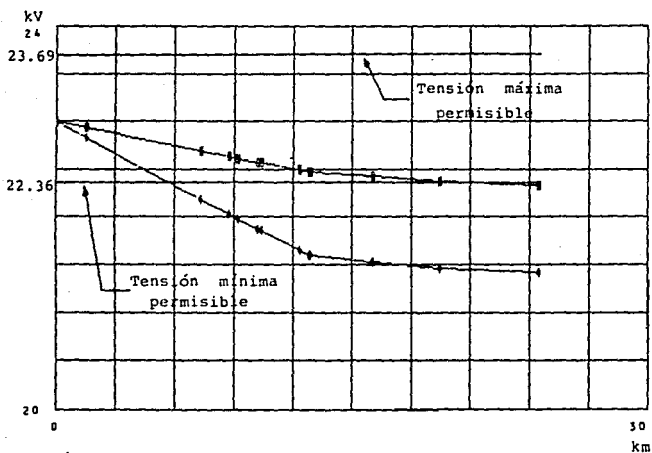
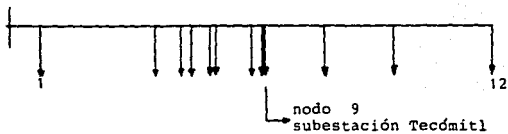
Porcentaje de calda = 2.87%

Calda en base de 127 volts = 3.6487V

Tabla V.2

SUBESTACION CHALCO

ALIMENTADOR CHA - 21



◇ Perfil de tensión en condición de carga máxima.

□ Perfil de tensión en condición de carga mínima.

figura V.2

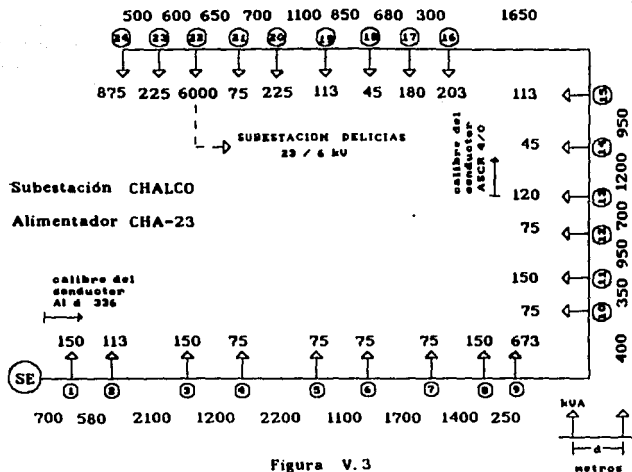


Figura V.3

CHA-23 Subestación Chalco

Demanda máxima = 190 amp.
 Número de tramos = 24
 Factor de utilización = .348778908
 Factor de potencia = .9445
 Longitud total del troncal = 22810 m

Tramo	Longitud (m)	S instalada (kVA)	Corriente (amp)	Caída (V)	Tensión (kV)
1	700	150	179.46 - j 62.42	57.25	22.9428
2	580	113	178.22 - j 61.99	47.11	22.8956
3	2100	150	177.29 - j 61.66	169.66	22.7260
4	1200	75	176.05 - j 61.23	96.27	22.6297
5	2200	75	175.43 - j 61.02	175.88	22.4538
6	1100	75	174.81 - j 60.80	87.63	22.3662
7	1700	75	174.19 - j 60.59	134.94	22.2313
8	1400	150	173.57 - j 60.37	110.73	22.1205
9	250	673	172.33 - j 59.94	19.63	22.1009
10	400	75	166.77 - j 58.00	30.40	22.0705
11	350	150	166.15 - j 57.79	26.50	22.0440
12	950	75	164.91 - j 57.36	71.39	21.9726
13	700	120	164.29 - j 57.14	52.41	21.9202
14	1200	45	163.29 - j 56.80	109.23	21.8110
15	950	113	162.92 - j 56.67	86.28	21.7247
16	1650	203	161.99 - j 56.34	148.99	21.5757
17	300	180	160.32 - j 55.76	26.81	21.5489
18	680	45	158.83 - j 55.24	60.20	21.4887
19	850	113	158.46 - j 55.11	75.08	21.4136
20	1100	225	157.53 - j 54.79	96.59	21.3170
21	700	75	155.66 - j 54.14	60.74	21.2563
22	650	6000 *	155.04 - j 53.93	56.18	21.2001
23	600	225	9.10 - j 3.16	3.04	21.1970
24	500	875	7.24 - j 2.52	2.02	21.1950

* Carga conocida

**** Caída total del alimentador = 1784.335V

Porcentaje de caída = 7.76%

Caída en base de 127 volts = 9.8526V

Tabla V.3

CHA-23 Subestación Chalco

Demanda minima = 60 amp.
 Número de tramos = 24
 Factor de utilización = .237774694
 Factor de potencia = .9445
 Longitud total del troncal = 22810 m

Tramo	Longitud (m)	S instalada (kVA)	Corriente (amp)	Caída (V)	Tensión (kV)
1	700	150	56.67 - j 19.71	18.08	22.9819
2	580	113	55.83 - j 19.42	14.76	22.9672
3	2100	150	55.19 - j 19.20	52.82	22.9143
4	1200	75	54.35 - j 18.90	29.72	22.8846
5	2200	75	53.92 - j 18.76	54.06	22.8306
6	1100	75	53.50 - j 18.61	26.82	22.8037
7	1700	75	53.08 - j 18.46	41.12	22.7626
8	1400	150	52.65 - j 18.31	33.59	22.7290
9	250	673	51.81 - j 18.02	5.90	22.7231
10	400	75	48.02 - j 16.70	8.75	22.7144
11	350	150	47.60 - j 16.55	7.59	22.7068
12	950	75	46.75 - j 16.26	20.24	22.6866
13	700	120	46.33 - j 16.11	14.78	22.6718
14	1200	45	45.65 - j 15.88	30.54	22.6412
15	950	113	45.40 - j 15.79	24.04	22.6172
16	1650	203	44.76 - j 15.57	41.17	22.5760
17	300	180	43.62 - j 15.17	7.29	22.5687
18	680	45	42.61 - j 14.82	16.15	22.5526
19	850	113	42.35 - j 14.73	20.07	22.5325
20	1100	225	41.72 - j 14.51	25.58	22.5069
21	700	75	40.45 - j 14.07	15.78	22.4911
22	650	6000	40.03 - j 13.92	14.50	22.4766
23	600	225	6.20 - j 2.16	2.07	22.4746
24	500	875	4.93 - j 1.72	1.37	22.4732

* Carga conocida

**** Caída total del alimentador = 520.919V

Porcentaje de caída = 2.26%

Caída en base de 127 volts = 2.8764V

Tabla V.4

SUBESTACION CHALCO

ALIMENTADOR CHA - 23

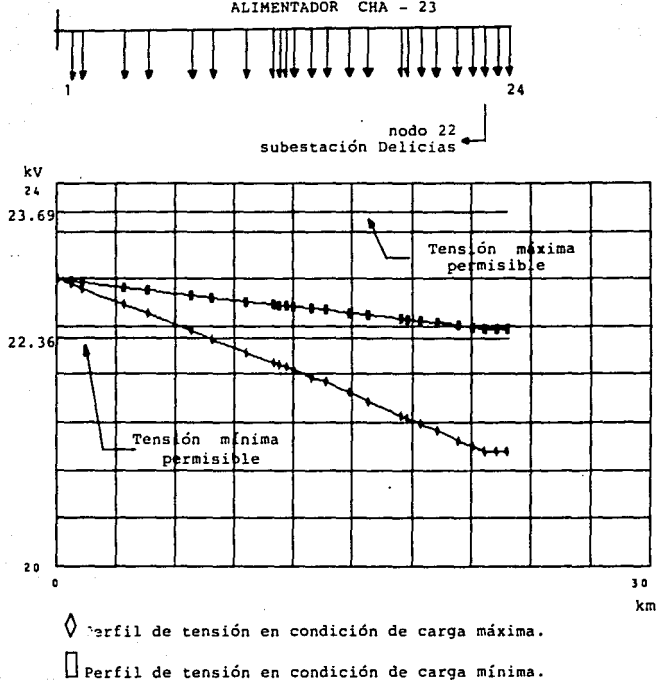


figura V.4

V.3 Aplicación de reguladores

Los reguladores de tensión se pueden aplicar en la subestación o sobre los alimentadores, en grupo de alimentadores o en cada alimentador. En este caso se pensó en aplicar un regulador para los dos alimentadores, ya que presentan características similares. Sin embargo no fue posible debido a que la caída de tensión total de ambos sobrepasa el ancho de banda del sistema (1.32 kV). Por lo tanto es necesario en ambos casos colocar uno o más bancos de reguladores en algún punto intermedio del alimentador.

Los reguladores de distribución para colocarse en poste son generalmente monofásicos y se fabrican para tensiones hasta 19,920 V. En los alimentadores que se estudian en este trabajo la tensión de fase a fase es de 23,000 V y la de fase a neutro de 13,200 V, lo que obliga a colocar los reguladores en estrella aterrizada, ya que no existen en el mercado reguladores con el nivel de aislamiento suficiente para aplicarlos en delta o delta abierta en este caso particular. Cabe aclarar que para alimentadores con tensiones menores a 19,920 V de fase a fase es más conveniente, en general, conectar los reguladores en delta abierta ya que implica un menor costo.

Para aprovechar el rango de tensión arriba de la nominal que se puede utilizar, se propone elevar la tensión del bus hasta el valor máximo posible. Como se mencionó anteriormente, la tensión máxima permisible es 23,690 V, pero se debe tomar en cuenta el ancho de banda del cambiador automático de derivaciones del transformador de potencia en la subestación, que es el que proporciona la regulación del bus. En general, el ancho de banda se puede estimar en un 2% de la tensión nominal, es decir, 460 V. Se utiliza el valor de 2% para el ancho de banda, ya que se ha encontrado en forma estadística para distintas compañías eléctricas que este es un valor típico de

ajuste que proporciona un operación adecuada en la mayor parte de los casos. Por lo tanto el valor máximo de ajuste para el bus es:

$$23,690 - (460 / 2) = 23,460 \text{ V}$$

Dado el nuevo valor de tensión máxima permisible de 23,460 V se sugiere un valor de ajuste de 23,400 V, dando un pequeño margen de seguridad, para cubrir posibles errores en la estimación del ancho de banda.

A partir de este valor de bus regulado a 23,400 V y una configuración en estrella aterrizada sobre cada alimentador se desarrollan las soluciones para cada alimentador, utilizando reguladores monofásicos McGraw-Edison VR-32 con control microprocesado CL-4B.

V.3.1 Aplicación de reguladores al alimentador CHA-21

Para conocer el punto donde debe ser ubicado el primer banco de regulación, debemos buscar hasta que carga se mantienen los niveles de tensión permitidos, tomando en cuenta el nuevo ajuste del bus y el ancho de banda (BW). En la siguiente tabla (V.5), la tensión para demanda máxima se obtiene de restar las caídas en cada tramo (de la tabla V.1) a partir de el nuevo valor de ajuste en el bus:

TRAMO	LONGITUD (M)	S INSTALADA (kVA)	TENSION D. MÁXIMA (V)	CAIDA CON BW (V)
1	1500	450	23,232.13	23,002.13
2	5800	300	22,589.78	22,359.78
3	1400	525	22,435.82	22,205.82

Tabla V.5

Con el bus en 23,400 V, la tensión en la tercera carga es:

$$V_3 = 22,435 \text{ V}$$

y restandole la mitad del ancho de banda:

$$22,435 - 230 = 22,205 \text{ V}$$

Por lo que quedaría por debajo de la tensión mínima permisible (22,366). El regulador debe ser colocado entonces antes de la tercera carga, en el punto más cercano posible a esta.

Ajustando los reguladores a un ancho de banda de 2%, 460 V, la máxima caída regulable con un solo banco de regulación es la diferencia entre los valores de tensión máxima y mínima permisibles menos el ancho de banda:

$$1,320 - 460 = 860 \text{ V}$$

De la tercera carga hasta el final del alimentador la caída es igual a 612 V, por lo que es posible corregir el problema con un solo banco de reguladores. Para este valor de ancho de banda se sugiere un tiempo de retardo de 30 segundos, que al igual que el 2% del ancho de banda, se sugiere en base a información estadística de varias compañías eléctricas.

$$t_p = 30 \text{ segundos}$$

- Aproximación al rango de regulación.

El rango de regulación está dado según la ecuación IV.4 por:

$V_2 = 22,366 \text{ V}$	- tensión mínima permisible
$V_{Emin} = 22,205 \text{ V}$	- V_3 menos ancho de banda
$V_{02} = 612 \text{ V}$	- V_3 menos V_{12} de tabla V.1
$V_3 = 460 \text{ V}$	

$$R = (22,366 - 22,205 + 612 + 230) / 22,205$$

$$R = 4.51 \% \text{ ---- rango de regulación}$$

- Capacidad del regulador

La capacidad de cada regulador monofásico se calcula a partir de la ecuación IV.5, en función de la tensión entre terminales S y SL del regulador y de la corriente de fase.

$$\text{kVAR} = 0.06 \times 13.28 \times 260 = 207 \text{ kVA}$$

- Selección del regulador

De acuerdo a los cálculos anteriores y los reguladores existentes, se seleccionaron tres reguladores monofásicos, cada uno con aislamiento para 13,800 V y capacidad nominal de 276 kVA, que puede manejar hasta 270 Amp con $\pm 6 \frac{1}{4} \%$ de regulación en un sistema de 13,200 V de fase a tierra y 23,000 V entre fases. Existe un regulador para 207 kVA, pero no se seleccionó por que cualquier ampliación en la carga provocaría que el regulador se sobrecargara.

- Selección del punto para el compensador de línea

De acuerdo con el procedimiento descrito en el capítulo IV, el punto de regulación se selecciona por un método gráfico (fig. IV.18). Las caídas, desde el punto donde se colocara el regulador hasta el final del alimentador, para carga máxima y mínima respectivamente son:

$$V_p = 611.7 \text{ V y } V_L = 293.6 \text{ V}$$

$$\text{de } V_3 - V_{12} \text{ de tabla V.1 y V.2}$$

Se trazaron los perfiles de tensión con carga máxima y

mínima, partiendo desde el regulador hasta el final del alimentador, a partir de los siguientes valores:

$$V_3 = V_{nom} + V_p / 2 \text{ para carga máxima y}$$

$$V_3 = V_{nom} + V_L / 2 \text{ para carga mínima.}$$

La tabla V.6 muestra los valores de tensión que resultarían al final de cada tramo de alimentador después de aplicar el banco de reguladores, tomando en cuenta el ajuste en la tensión del bus y a partir de la tercera carga, el efecto del regulador. Es decir, los valores obtenidos para carga máxima se calcularon restando las caídas de la tabla V.1 a partir de los valores obtenidos con las ecuaciones anteriores de V_3 . El procedimiento para carga mínima fue similar con la tabla V.2

TRAMO	LONGITUD (M)	S INSTALADA (kVA)	V. DEM. MAXIMA (V)	V. DEM. MINIMA (V)
1	1500	450	23,232.13	23,335.44
2	5800	300	22,589.78	23,090.97
-3	1400	525	22,435.82	23,032.79
+3			23,305.85	23,146.80
4	500	75	23,251.54	23,126.54
5	1000	300	23,143.11	23,086.18
6	100	1650	23,132.34	23,082.20
7	2000	300	22,925.56	23,009.22
8	500	2250	22,874.25	22,991.27
9	10	7630	22,873.28	22,990.96
10	3200	375	22,805.52	22,938.86
11	3500	4675	22,734.80	22,884.49
12	5000	3150	22,694.13	22,853.22

Tabla V.6

Con los datos de esta tabla se formaron los perfiles de tensión de la figura V.5. De la tabla y la figura se observa que los perfiles se cruzan en el séptimo tramo. Además, V_{12} de

carga máxima menos 230 V del ancho de banda dan 22,464 V, que están dentro de los límites establecidos.

El punto de regulación se encontró 2,300 m adelante del regulador, a 11,000 m de la subestación. La tensión de ajuste resultó 23,060 V.

- Valores de ajuste de R y X para el compensador por caída de línea.

En el tipo de control seleccionado, los valores de ajuste son directamente los valores eficaces de resistencia y reactancia. Para encontrar estos se utilizaron las ecuaciones IV.9 y IV.10, donde V_{DR} y V_{DX} son:

$$V_{DR} = I_{34} R_{34} + I_{45} R_{45} + I_{56} R_{56} + I_{6p} R_{6p}$$

$$V_{DX} = I_{34} X_{34} + I_{45} X_{45} + I_{56} X_{56} + I_{6p} X_{6p}$$

$$L_{6p} = 700 \text{ m}$$

$$V_{DR} = 107.96 \text{ V}$$

$$V_{DX} = 220.90 \text{ V}$$

$$I_T = 252.36 \text{ Amp.}$$

$$R_{EF} = 0.4278 \text{ ohms} \quad \text{---- resistencia eficaz y de ajuste}$$

$$X_{EF} = 0.8753 \text{ ohms} \quad \text{--- reactancia eficaz y de ajuste}$$

Resumiendo las características y valores de ajuste de los reguladores propuestos:

- Tres reguladores monofásicos en estrella aterrizada.
- Tensión nominal 13.8 kV, para operar en 13.2 kV (fase a tierra)
- Capacidad nominal 276 kVA

- Rango de regulación $\pm 6 \frac{1}{4}\%$
- Banco colocado antes de la tercera carga, a 8,700 m del bus
- Tensión de ajuste en el punto de regulación 127.33 V
(base 127 V), 23,060 V
- R de ajuste 0.4248 ohms
- X de ajuste 0.8753 ohms
- Ancho de banda del control 2.54 V (base 127 V)
- Tiempo de retardo 30 segundos

El perfil de tensión resultante para el alimentador CHA-21 aplicando esta solución se muestra a continuación (figura V.5). Se indican las tensiones máxima y mínima permisibles, el punto de regulación y la zona en la que se encontrarán las tensiones tomando en cuenta el ancho de banda.

V.3.2 Aplicación de reguladores al alimentador CHA-23

Para conocer el punto donde debe ser ubicado el primer banco de regulación, debemos buscar hasta que carga se mantienen los niveles de tensión permitidos, tomando en cuenta el nuevo ajuste del bus y el ancho de banda (BW). En la siguiente tabla (V.7), la tensión para demanda máxima se obtiene de restar las caídas en cada tramo (de la tabla V.3) a partir de el nuevo valor de ajuste en el bus:

TRAMO	LONGITUD (M)	S INSTALADA (kVA)	V. DEM. MAXIMA (V)	CAIDA CON BW (V)
1	700	150	23,342.76	23,112.76
2	580	113	23,295.66	23,065.66
3	2100	150	23,126.01	22,896.01
4	1200	75	23,029.74	22,799.74
5	2200	75	22,853.87	22,623.87
6	1100	75	22,766.25	22,536.25
7	1700	75	22,631.31	22,401.31
8	1400	150	22,520.58	22,290.58

Tabla V.7

ALIMENTADOR CHA - 21

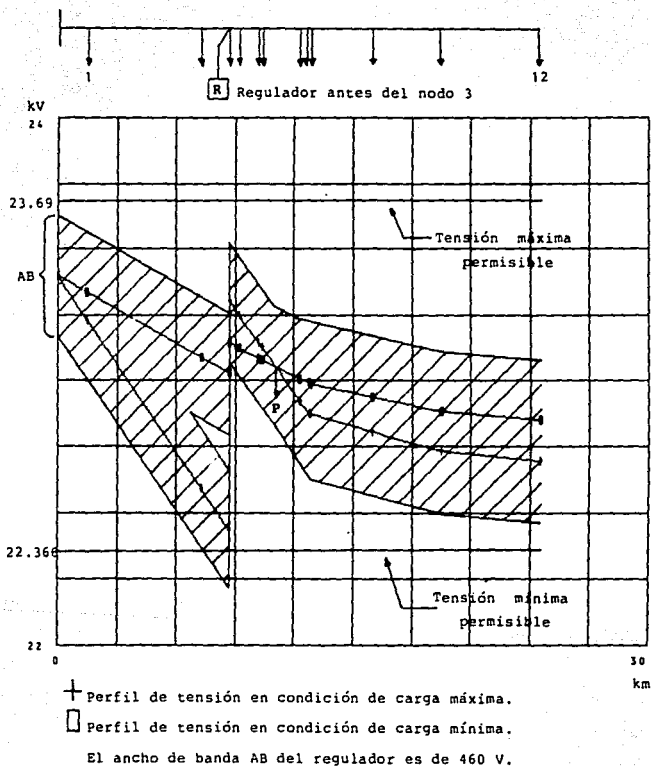


figura V.5

Con el bus en 23,400 V, la tensión en la octava carga es:

$$V_8 = 22,520 \text{ V}$$

y restandole la mitad del ancho de banda:

$$22,520 - 230 = 22,290 \text{ V}$$

Por lo que quedaría por debajo de la tensión mínima permisible (22,366). El regulador debe ser colocado entonces antes de la octava carga, en el punto más cercano posible a esta.

Ajustando los reguladores a un ancho de banda de 2%, 460 V, la máxima caída regulable con un solo banco de regulación es:

$$1,320 - 460 = 860 \text{ V}$$

De la octava carga hasta el final del alimentador la caída es igual a 925 V, por lo que con este ancho de banda y un solo banco de reguladores, existirían tensiones fuera del ancho de banda del sistema. Sin embargo, es posible reducir el ancho de banda del control hasta un valor de 2 V en base de 127 V o 362 V en base de 23 kV, con lo que la máxima caída regulable con un solo banco de regulación aumenta hasta:

$$1,320 - 362 = 958 \text{ V}$$

El ajustar el ancho de banda del control a su valor mínimo implica dar un tiempo de retardo relativamente grande para evitar un número excesivo de operaciones. Otra manera de corregir el problema sería utilizar dos bancos de regulación en lugar de uno, lo que prácticamente duplicaría el costo de la solución, obteniendo un beneficio mínimo, por lo que se recomienda utilizar un solo banco con el menor ancho de banda posible. Se sugiere un valor de tiempo de retardo de 1 minuto.

Este valor se puede cambiar utilizando la facilidad que da el regulador de registrar el número de operaciones que realizó en un periodo determinado y si este valor es excesivo se puede aumentar aún más el tiempo de retardo. El control permite tiempos de retardo desde 5 hasta 180 segundos.

$$t_b = 60 \text{ segundos}$$

- Aproximación al rango de regulación

El rango de regulación está dado según la ecuación IV.4 por:

$$V_2 = 22,366 \text{ V} \quad - \text{ tensión mínima permisible}$$

$$V_{\text{min}} = 22,290 \text{ V} \quad - V_2 \text{ menos ancho de banda}$$

$$V_{D2} = 925 \text{ V} \quad - V_2 \text{ menos } V_{2i} \text{ de tabla V.3}$$

$$V_B = 382 \text{ V}$$

$$R = (22,366 - 22,290 + 925 + 181) / 22,290$$

$$R = 5.3 \text{ \%} \quad \text{---- rango de regulación}$$

- Capacidad del regulador

La capacidad de cada regulador monofásico se calcula a partir de la ecuación IV.5, en función de la tensión entre terminales S y SL del regulador y de la corriente de fase.

$$\text{kVAR} = 0.06 \times 13.28 \times 190 = 151 \text{ kVA}$$

- Selección del regulador

De acuerdo a los cálculos anteriores y los reguladores existentes, se seleccionaron tres reguladores monofásicos, cada uno con aislamiento para 13,800 V y capacidad nominal de 207 kVA, que puede manejar hasta 203 Amp con $\pm 1/4 \%$ de regulación en un sistema de 13,200 V de fase a tierra y 23,000 V entre fases.

- Selección del punto para el compensador de línea

De acuerdo con el procedimiento descrito en el capítulo IV, el punto de regulación se selecciona por un método gráfico (figura IV.18). Las caldas, desde el punto donde se colocara el regulador hasta el final del alimentador, para carga máxima y mínima respectivamente son:

$$V_p = 925.5 \text{ V y } V_L = 255.8 \text{ V}$$

de $V_8 - V_{24}$ de tablas V.3 y V.4

Se trazaron los perfiles de tensión con carga máxima y mínima, partiendo desde el regulador hasta el final del alimentador, a partir de los siguientes valores:

$$V_8 = V_{nos} + V_p / 2 \text{ para carga máxima y}$$

$$V_8 = V_{nos} + V_L / 2 \text{ para carga mínima.}$$

La tabla V.8 muestra los valores de tensión que resultarían al final de cada tramo de alimentador después de aplicar el banco de reguladores, tomando en cuenta el ajuste en la tensión del bus y a partir de la octava carga, el efecto del regulador. Es decir, los valores obtenidos para carga máxima se calcularon restando las caídas de la tabla V.3 a partir de los valores obtenidos con las ecuaciones anteriores de V_8 . El procedimiento para carga mínima fue similar con la tabla V.4

Con los datos de esta tabla se formaron los perfiles de tensión de la figura V.6. De la tabla y la figura se observa que los perfiles se cruzan en el 16° tramo. Además, V_{24} de carga máxima menos 181 V del ancho de banda dan 22,356 V, que están en el límite establecido.

TRAMO	LONGITUD (M)	S INSTALADA (kVA)	V. DEM. MAXIMA (V)	V. DEM. MINIMA (V)
1	700	150	23,342.76	23,381.92
2	580	113	23,295.66	23,367.16
3	2100	150	23,126.01	23,314.34
4	1200	75	23,029.74	23,284.62
5	2200	75	22,853.87	23,230.56
6	1100	75	22,766.25	23,203.74
7	1700	75	22,631.31	23,162.62
-8	1400	150	22,520.58	23,129.03
+8			23,462.75	23,127.90
9	250	673	23,443.12	23,122.00
10	400	75	23,412.72	23,113.25
11	350	150	23,386.22	23,105.66
12	950	75	23,314.83	23,085.42
13	700	120	23,262.43	23,070.64
14	1200	45	23,153.20	23,040.10
15	950	113	23,066.93	23,016.06
16	1650	203	22,917.94	22,974.89
17	300	180	22,891.13	22,967.60
18	680	45	22,830.93	22,951.45
19	850	113	22,755.85	22,931.38
20	1100	225	22,659.26	22,905.80
21	700	75	22,598.52	22,890.02
22	650	6000	22,542.34	22,875.52
23	600	225	22,539.30	22,873.45
24	500	875	22,537.28	22,872.08

Tabla V.8

El punto de regulación se encontró 5,620 m adelante del regulador, a 16,600 m de la subestación. La tensión de ajuste resultó 23,000 V.

- Valores de ajuste de R y X para el compensador por carga de línea.

En el tipo de control seleccionado, los valores de ajuste son directamente los valores eficaces de resistencia y reactancia. Para encontrar estos se utilizaron las ecuaciones IV.9 y IV.10, donde V_{DR} y V_{DX} son:

$$V_{DR} = I_{R9} R_{R9} + I_{R10} R_{R10} + \dots + I_{R15} R_{R15}$$

$$V_{DX} = I_{X9} X_{X9} + I_{X10} X_{X10} + \dots + I_{X15} X_{X15}$$

$$I_{R15} = 820 \text{ a}$$

Para realizar este cálculo debe tomarse en cuenta que existe un cambio en el calibre del conductor en esta sección del alimentador.

$$V_{DR} = 77.01 \text{ V}$$

$$V_{DX} = 105.65 \text{ V}$$

$$I_r = 54.85 \text{ Amp.}$$

$$R_{Rr} = 1.40 \text{ ohms} \text{ ---- resistencia eficaz y de ajuste}$$

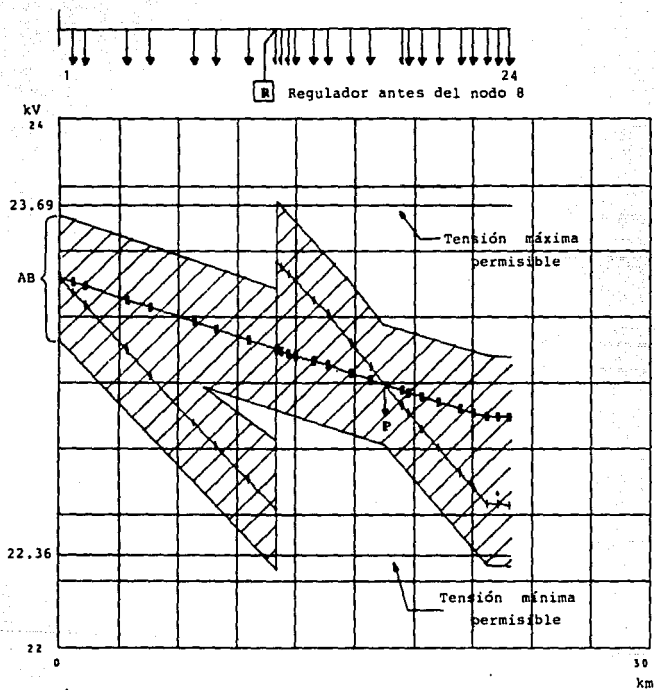
$$X_{Rr} = 1.93 \text{ ohms} \text{ ---- reactancia eficaz y de ajuste}$$

Resumiendo las características y valores de ajuste de los reguladores propuestos:

- Tres reguladores monofásicos en estrella aterrizada.
- Tensión nominal 13.8 kV (fase a tierra)
- Capacidad nominal 207 kVA
- Rango de regulación +/-6 1/4%
- Banco colocado antes de la octava carga, a 10,980 m del bus
- Tensión de ajuste en el punto de regulación 127 V (base 127 V), 23,000 V
- R de ajuste 1.40 ohms
- X de ajuste 1.93 ohms
- Ancho de banda del control 2 V (base 127 V)
- Tiempo de retardo 60 segundos

El perfil de tensión para el alimentador CHA-23 aplicando esta solución se muestra a continuación. Se indican las tensiones máxima y mínima permisibles, el punto de regulación y la zona en la que se encontraran las tensiones tomando en cuenta el ancho de banda.

ALIMENTADOR CHA - 23



+ Perfil de tensión en condición de carga máxima.

□ Perfil de tensión en condición de carga mínima.

El ancho de banda AB del regulador es de 460 V.

figura V.6

V.4 Aplicación de bancos de capacitores en paralelo.

El criterio comúnmente usado para determinar la aplicación de bancos de capacitores en un alimentador es la reducción de pérdidas de potencia, pero también, se debe considerar el incremento de tensión o la liberación de capacidad como criterios para determinar su utilización.

En este estudio se estableció que la reducción de pérdidas y la caída de tensión en la línea fuesen los puntos a considerar para evaluar la aplicación de bancos de capacitores en los alimentadores CHA-21 y CHA-23. De acuerdo a estos puntos se desarrollaron las subrutinas de localización de bancos de capacitores del programa presentado al inicio de este capítulo. Para la evaluación de las pérdidas se utilizó el método de Maxwell descrito en el capítulo anterior (IV.2.2.4). Las rutinas de localización trabajan a partir de la corriente real y reactiva en cada tramo del alimentador y entregan como resultado el estado actual del alimentador, un listado con la reducción de pérdidas y porcentaje de caída de tensión en el alimentador al ubicar el banco de capacitores, propuesto en cada nodo, y finalmente el estado que presentaría el alimentador con el banco localizado en el nodo seleccionado.

Las capacidades de los bancos utilizados están de acuerdo a lo establecido por las normas de la Compañía de Luz y Fuerza y son:

Bancos de capacitores fijos:

Capacidad del banco = 900 kVAR

Formado por 2 unidades de 150 kVAR en paralelo, por fase.
o 1 unidad de 300 kVAR, por fase.

Bancos de capacitores desconectables:

Capacidad del banco = 1800 kVAR

Formado por 2 unidades de 300 kVAR en paralelo, por fase.

Control de desconexión del tipo tensión - corriente.

Debido a que el presente trabajo tiene por intención el estudio de la regulación de tensión en alimentadores del sistema de distribución el primer paso en el desarrollo de esta solución fue determinar cual sería el porcentaje de caída de tensión en el alimentador si se lograra compensar al 100 % la corriente reactiva inductiva de la línea. Para esto se hizo que el programa igualara a cero la corriente reactiva y obtuviera los valores de caída de tensión.

Los resultados obtenidos (tabla V.9) para el CHA-21 son: una caída de tensión total en el alimentador de 1470.772 V es decir, un porcentaje de 6.39 %. La caída de tensión total, original (tabla V.1), es de 1575.881 V (6.85%). El resultado anterior representa una mejora con respecto a la condición real de 0.46% en caída de tensión.

Para el CHA-23 los resultados obtenidos (tabla V.10) son: una caída de tensión total en el alimentador de 1685.305 V es decir, un porcentaje de 7.33 %. La caída de tensión total original (tabla V.3), es de 1784.35 (7.76%). Esto representa una mejora con respecto a la condición real de 0.43% en caída de tensión.

Estos resultados indican que la aplicación de bancos de capacitores, bajo un criterio de mejorar la caída de tensión de los alimentadores, no se justifica ya que la mejora que se obtiene en los niveles de tensión no es significativa. Este resultado era esperado ya que ambos alimentadores presentan un factor de potencia alto, por lo que el criterio a utilizar en adelante será el de reducción de pérdidas.

CHA-21 Subestación Chalco

condicion actual del alimentador :

Tramo	Longitud (m)	S instalada (kVA)	Corriente (amp)		Pérdidas (kW)	Caida (V)	Tensión (kV)
1	1500	450	242.67	0.00 j	50.083	156.67	22.8433
2	5800	300	240.15	0.00 j	189.654	599.50	22.2438
3	1400	525	238.47	0.00 j	45.140	143.70	22.1001
4	500	75	235.53	0.00 j	15.727	50.69	22.0494
5	1000	300	235.11	0.00 j	31.341	101.19	21.9482
6	100	1650	233.43	0.00 j	3.089	10.05	21.9382
7	2000	300	224.19	0.00 j	56.995	192.99	21.7452
8	500	2250	222.51	0.00 j	14.036	47.89	21.6973
9	10	7630	209.91	0.00 j*	0.250	0.90	21.6964
10	3200	375	45.91	0.00 j	3.825	63.24	21.6332
11	3500	4675	43.81	0.00 j	3.809	66.00	21.5672
12	5000	3150	17.64	0.00 j	0.882	37.96	21.5292

* Carga conocida

Pérdidas totales del alimentador = 414.831 kW

Potencia reactiva demandada por el alimentador = 0.000 KVAR

Caida total del alimentador = 1470.772 V

Porcentaje de caida = 6.39 %

Caida en base de 127 volts = 8.1212 V

Tabla V.9

CHA-23 Subestación Chalco

condición actual del alimentador :

Tramo	Longitud (m)	S instalada (kVA)	Corriente (amp)		Pérdidas (kW)	Caída (V)	Tensión (kV)
1	700	150	179.46	0.00 j	12.783	54.07	22.9459
2	580	113	178.22	0.00 j	10.445	44.49	22.9014
3	2100	150	177.29	0.00 j	37.426	160.25	22.7412
4	1200	75	176.05	0.00 j	21.088	90.93	22.6503
5	2200	75	175.43	0.00 j	38.389	166.12	22.4841
6	1100	75	174.81	0.00 j	19.059	82.76	22.4014
7	1700	75	174.19	0.00 j	29.246	127.46	22.2739
8	1400	150	173.57	0.00 j	23.914	104.59	22.1693
9	250	673	172.33	0.00 j	4.210	18.54	22.1508
10	400	75	166.77	0.00 j	6.308	28.71	22.1221
11	350	150	166.15	0.00 j	5.478	25.03	22.0971
12	950	75	164.91	0.00 j	14.648	67.43	22.0296
13	700	120	164.29	0.00 j	10.712	49.50	21.9801
14	1200	45	163.29	0.00 j	34.942	103.17	21.8770
15	950	113	162.92	0.00 j	27.536	81.49	21.7955
16	1650	203	161.99	0.00 j	47.281	140.73	21.6547
17	300	180	160.32	0.00 j	8.420	25.32	21.6294
18	680	45	158.83	0.00 j	18.732	56.86	21.5726
19	850	113	158.46	0.00 j	23.306	70.91	21.5016
20	1100	225	157.53	0.00 j	29.807	91.23	21.4104
21	700	75	155.66	0.00 j	18.523	37.37	21.3530
22	650	6000	155.04	0.00 j*	17.063	53.06	21.3000
23	600	225	9.10	0.00 j	0.054	2.87	21.2971
24	500	875	7.24	0.00 j	0.029	1.90	21.2952

* Carga conocida

Pérdidas totales del alimentador = 459.397 kW

Potencia reactiva demandada por el alimentador = 0.000 kVAR

Caída total del alimentador = 1685.305 V

Porcentaje de caída = 7.33 %

Caída en base de 127 volts = 9.3058 V

Tabla V.10

La demanda de potencia reactiva de los alimentadores, se calcula de acuerdo a la siguiente expresi3n:

$$Q = \sqrt{3} V I \text{ sen } \theta \quad [\text{VAR}]$$

donde:

V : tensi3n nominal del sistema.
I sen θ : componente reactiva de la corriente de lnea.

El alimentador CHA-21 tiene, bajo condici3n de carga m3xima (tabla V.1), una corriente reactiva igual a 93.37 A. Y en condici3n de carga m3nima (tabla V.2) es de 35.91 A. Por lo tanto su demanda de potencia reactiva m3xima es :

$$Q_{\text{Max}} = \sqrt{3} \times 23 \times 93.37 = 3,719 \text{ kVAR}$$

y la demanda m3nima es:

$$Q_{\text{Min}} = \sqrt{3} \times 23 \times 35.91 = 1,430 \text{ kVAR}$$

En forma similar, para el alimentador CHA-23, la demanda de potencia reactiva m3xima (tabla V.3) es de:

$$Q_{\text{Max}} = \sqrt{3} \times 23 \times 84.42 = 2,486 \text{ kVAR}$$

y la demanda m3nima (tabla V.4) es:

$$Q_{\text{Min}} = \sqrt{3} \times 23 \times 19.71 = 785 \text{ kVAR}$$

V.4.1 Aplicaci3n de bancos de capacitores al alimentador CHA - 21

El alimentador CHA-21 presenta una demanda de potencia reactiva m3xima de 3719 kVAR y m3nima de 1430 kVAR por lo que se propone la instalaci3n de dos bancos de capacitores; uno de

tipo fijo de 900 kVAR el cual suministrará la mayor parte de la potencia reactiva constante demandada en el ciclo de 24 horas, y otro de tipo desconectable de 1800 kVAR. Cuando el banco desconectable entre en operación el alimentador recibirá 2700 kVAR de los capacitores y el sistema solo tendrá que aportar los restantes 1019 kVAR. No se propone la instalación de otro banco desconectable porque aproximadamente la mitad de la capacidad del banco se desperdiciaría y su tiempo de operación sería mínimo. Por otra parte de acuerdo con la expresión IV.28 al obtener el valor del cociente de los kVAR capacitivos entre kVAR demandados por el alimentador se tiene un valor de 0.726 que ya se encuentra dentro del rango recomendado.

$$\begin{array}{r} 900 + 1800 \\ \hline \text{-----} = 0.726 \\ 3719 \end{array}$$

El criterio para la operación de el control de disparo del banco desconectable puede ser por variación del factor de potencia o de acuerdo a la demanda máxima y mínima que se presente en el nodo donde se instale el banco de capacitores. En este caso como ambos alimentadores presentan un factor de potencia alto es más difícil observar las variaciones de éste por lo que se utilizará el segundo criterio.

El resultado del programa (tabla V.12) para localizar el banco de capacitores fijo, de 900 kVAR, indica que el nodo óptimo para su instalación es el nodo 11. Las tablas V.11 y V.13 muestran que el valor de las pérdidas en el alimentador sin bancos de capacitores es 476.242 kW y una demanda de potencia reactiva de -3719.483 kVAR. Con el banco instalado estos valores cambian a 449.074 kW y -2819.483 kVAR. Por lo tanto la reducción de pérdidas en el alimentador es de 27.168 kW y el porcentaje de caída de tensión se reduce a 6.60 %.

El segundo banco a localizar es el desconectable de 1800 kVAR. La corrida del programa muestra en la tabla V.15 que la

mayor reducción de pérdidas se obtiene en el nodo 9. De las tablas V.14 y V.16 se ve que los valores de pérdidas y potencia reactiva demandada, con el banco fijo instalado, son de 4449.074 kW y -2819.483 kVAR respectivamente. Con el banco de 1800 kVAR los valores son 419.024 kW y -1019.483 kVAR. Entonces, la reducción de pérdidas de potencia es de 30.051 kW y el porcentaje de caída de tensión se reduce a 6.42 %.

En total, con los dos bancos de capacitores instalados se obtiene una reducción de pérdidas de 57.218 kW, la potencia reactiva que debe suministrar el sistema durante la carga máxima es de 1019.48 kVAR y la reducción en el porcentaje de caída de tensión es de 0.43 %, respecto a la condición original del alimentador. El banco fijo de 900 kVAR deberá colocarse a 19500 mt del bus, antes del nodo 11. Y el banco desconectable de 1800 kVAR se instalará a 12800 mt del bus, antes del nodo 9 (subestación 23/6 kV Tecómitl).

La calibración del control de disparo del banco desconectable, de acuerdo con la grafica de la figura V.7, deberá hacer que el banco entre en operación cuando la demanda de potencia reactiva en el nodo 9 alcance el valor de 1000 kVAR y se desconecte para valores inferiores. Con el valor anterior se mantiene un margen de 100 kVAR entre el banco fijo y la operación del banco desconectable.

Como se propone un banco fijo para el alimentador es necesario realizar una corrida del programa con datos de condición de carga mínima, para verificar que los niveles de tensión no estén arriba del valor permisible. En la tabla V.17 se observa que la tensión en el nodo 1, con el banco de 900 kVAR en el nodo 11, es de 22.939 kV y el porcentaje de caída en el alimentador de 2.69 %. Estos valores se encuentran dentro de los límites establecidos en este trabajo.

ALIMENTADOR CHA - 21

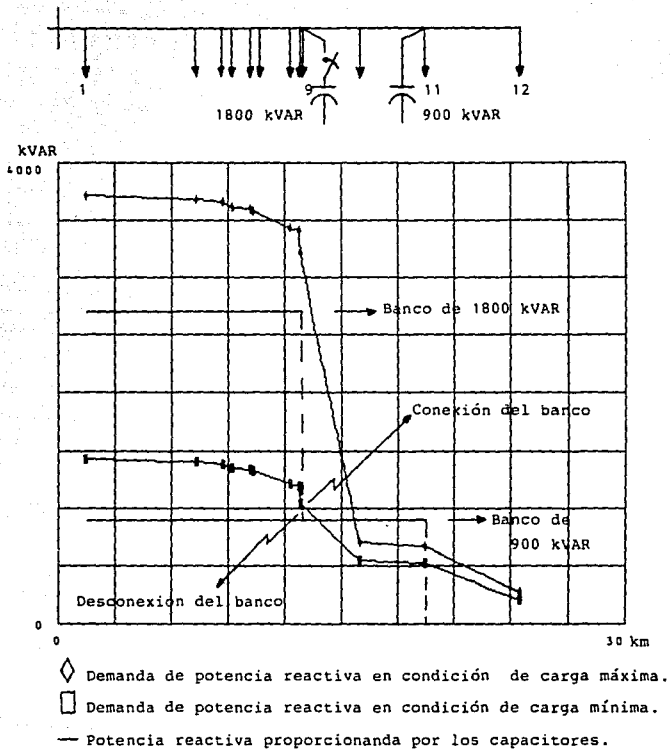


figura V.7

CHA-21 Subestación Chalco

condicion actual del alimentador :

Tramo	Longitud (m)	S instalada (kVA)	Corriente (amp)	Pérdidas (kW)	Caída (V)	Tensión (kV)
1	1500	450	242.67	-93.37 j	57.497	167.87
2	5800	300	240.15	-92.40 j	217.730	642.35
3	1400	525	238.47	-91.75 j	51.823	153.96
4	500	75	235.53	-90.62 j	18.055	54.31
5	1000	300	235.11	-90.46 j	35.981	108.43
6	100	1650	233.43	-89.81 j	3.547	10.77
7	2000	300	224.19	-86.26 j	65.433	206.78
8	500	2250	222.51	-85.61 j	16.114	51.31
9	10	7630	209.91	-80.76 j*	0.237	0.97
10	3200	375	45.91	-17.67 j	4.391	67.76
11	3500	4675	43.81	-16.86 j	4.773	70.72
12	5000	3150	17.64	-6.77 j	1.012	40.67

* Carga conocida

Pérdidas totales del alimentador = 476.242 kW

Potencia reactiva demandada por el alimentador = -3719.483 kVAR

Caída total del alimentador = 1575.881 V

Porcentaje de caída = 6.85 %

Caída en base de 127 volts = 8.7016 V

Tabla V.11

banco de capacitores (a instalar) localizado en nodo	Reducción de Pérdidas (kW)	% de caída de Tensión (%)
1	3.154	6.83
2	15.205	6.75
3	18.091	6.73
4	19.107	6.72
5	21.135	6.71
6	21.336	6.71
7	25.177	6.68
8	26.129	6.68
9	26.147	6.68
10	26.669	6.64
11	27.168	6.60
12	26.590	6.55

Tabla U.12

CHA-21 Subestación Chalco

Banco de capacitores (a instalar) de 900 kVAR localizado en el nodo => 11

Tramo	Longitud (m)	Corriente (amp)		Reducción de pérdidas (kW)	Caída (V)	Tensión (kV)
1	1500	242.67	-70.78 j	3.154	163.20	22.8368
2	5800	240.15	-69.81 j	12.051	624.32	22.2125
3	1400	238.47	-69.16 j	2.886	149.62	22.0629
4	500	235.53	-68.03 j	1.016	52.76	22.0101
5	1000	235.11	-67.87 j	2.028	105.33	21.9048
6	100	233.43	-67.22 j	0.201	10.46	21.8943
7	2000	224.19	-63.67 j	3.841	200.62	21.6937
8	500	222.51	-63.02 j	0.952	49.77	21.6439
9	10	209.91	-58.17 j *	0.018	0.94	21.6430
10	3200	45.91	4.93 j	0.522	63.60	21.5794
11	3500	43.81	5.73 j	0.499	66.57	21.5128
12	5000	17.64	-6.79 j	-0.578	40.67	21.4722

* Carga conocida

Pérdidas totales del alimentador = 449.074 kW

Reducción de pérdidas en el alimentador = 27.168 kW

Potencia reactiva demandada por el alimentador = -2819.483 kVAR

Caída total del alimentador = 1518.117 V

Porcentaje de caída = 6.60 %

Caída en base de 127 volts = 9.3826 V

Tabla V.13

CHA-21 Subestación Chalco

Condición actual del alimentador :

Banco de capacitores de 900 kVAR instalado en el nodo => 11

Tramo	Longitud (m)	S instalada (kVA)	Corriente (amp)		Pérdidas (kW)	Caída (V)	Tensión (kV)
1	1500	450	242.67	-70.78 j	54.343	163.20	22.8368
2	5800	300	240.15	-69.81 j	205.679	624.32	22.2125
3	1400	525	238.47	-69.16 j	48.937	149.62	22.0629
4	500	75	235.53	-68.03 j	17.039	52.76	22.0101
5	1000	300	235.11	-67.87 j	33.953	105.33	21.9048
6	100	1650	233.43	-67.22 j	3.346	10.46	21.8943
7	2000	300	224.19	-63.67 j	61.592	200.62	21.6937
8	500	2250	222.51	-63.02 j	15.162	49.77	21.6439
9	10	7630*	209.91	-58.17 j	0.269	0.94	21.6430
10	3200	375	45.91	4.93 j	3.869	63.60	21.5794
11	3500	4675	43.81	5.73 j	3.875	66.57	21.5128
12	5000	3150	17.64	-6.79 j	1.012	40.67	21.4722

* carga conocida

Pérdidas totales del alimentador = 449.074 kW

Potencia reactiva demandada por el alimentador = -2819.483 kVAR

Caída total del alimentador = 1518.117 V

Porcentaje de caída = 6.60 %

Caída en base de 127 volts = 8.3826 V

Tabla V.14

Banco de capacitores (a instalar) localizado en nodo	Reducción de pérdidas (kW)	% de caída de tensión (%)
1	3.703	6.57
2	17.734	6.48
3	21.075	6.46
4	22.239	6.45
5	24.559	6.44
6	24.787	6.44
7	28.997	6.42
8	30.032	6.42
9	30.051	6.42
10	27.154	6.40
11	24.131	6.40
12	20.082	6.40

Tabla V.15

CHA-21 Subestación Chalco

Banco de capacitores de 900 kVAR instalado en el nodo => 11

Banco de capacitores (a instalar) de 1800 kVAR localizado en el nodo => 9

Tramo	Longitud (m)	Corriente (amp)	Reducción de pérdidas (kW)	Caída (V)	Tensión (kV)	
1	1500	242.67	-25.59 j	3.703	157.54	22.8425
2	5800	240.15	-24.62 j	14.031	602.65	22.2398
3	1400	238.47	-23.98 j	3.340	144.42	22.0954
4	500	235.53	-22.84 j	1.164	50.93	22.0445
5	1000	235.11	-22.68 j	2.320	101.66	21.9428
6	100	233.43	-22.04 j	0.229	10.09	21.9327
7	2000	224.19	-18.48 j	4.209	193.64	21.7391
8	500	222.51	-17.84 j	1.036	48.04	21.6910
9	10	209.91	-12.99 j *	0.018	0.91	21.6901
10	3200	45.91	4.93 j	-2.897	63.60	21.6265
11	3500	43.81	5.73 j	-3.023	66.57	21.5600
12	5000	17.64	-6.79 j	-4.049	40.67	21.5193

* carga conocida

Pérdidas totales del alimentador = 419.024 kW

Reducción de pérdidas en el alimentador = 30.051 kW

Potencia reactiva demandada por el alimentador = -1019.483 kVAR

Caída total del alimentador = 1476.249 V

Porcentaje de caída = 6.42 %

Caída en base de 127 volts = 8.1515 V

Tabla V.16

CHA-21 Subestación Chalco

Condición actual del alimentador :

Banco de capacitores de 900 kVAR instalado en el nodo => 11

Tramo	Longitud (m)	S instalada (kVA)	Corriente (amp)		Pérdidas (kW)	Caída (V)	Tensión (kV)
1	1500	450	93.33	-13.32 j	7.560	60.87	22.9391
2	5800	300	91.40	-12.57 j	27.990	230.31	22.7088
3	1400	525	90.10	-12.08 j	6.560	54.78	22.6540
4	500	75	87.84	-11.21 j	2.223	19.06	22.6350
5	1000	300	87.52	-11.08 j	4.413	37.97	22.5970
6	100	1650	86.23	-10.59 j	0.428	3.74	22.5933
7	2000	300	79.13	-7.85 j	7.170	68.45	22.5248
8	500	2250	77.83	-7.36 j	1.733	16.83	22.5080
9	10	7630	68.15	-3.63 j	0.026	0.29	22.5077
10	3200	375	35.30	9.01 j	2.408	50.18	22.4575
11	3500	4675	33.69	9.63 j	2.436	52.78	22.4047
12	5000	3150	13.56	-5.22 j	0.599	31.27	22.3735

* carga conocida

Pérdidas totales del alimentador = 63.546 kW

Potencia reactiva demandada por el alimentador = -530.585 kVAR

Caída total del alimentador = 618.544 V

Porcentaje de caída = 2.69 %

Caída en base de 127 volts = 3.4154 V

Tabla V.17

V.4.2 Aplicación de bancos de capacitores al alimentador CHA - 23

El alimentador CHA-23 presenta una demanda de potencia reactiva máxima de 2486 kVAR y mínima de 785 kVAR, por lo que, de igual manera que en el caso anterior, se propone la instalación de dos bancos de capacitores, uno del tipo fijo de 900 kVAR que suministrará alrededor de 115 kVAR más que la demanda constante de potencia reactiva y otro desconectable de 1800 kVAR. Con estos dos bancos se compensa la demanda máxima e inclusive se tiene un exceso de 215 kVAR. Por otra parte de acuerdo con la expresión IV.28 al obtener el valor del cociente de los kVAR capacitivos entre kVAR demandados por el alimentador se tiene un valor de 1.08 que es superior al recomendado de > 0.7 .

$$\begin{array}{r} 900 + 1800 \\ \hline \quad \quad \quad = 1.08 \\ 2486 \end{array}$$

El resultado del programa (tabla V.19) para localizar el banco de capacitores fijo, de 900 kVAR, indica que el nodo óptimo para su instalación es el nodo 22. Las tablas V.18 y V.20 muestran que el valor de las pérdidas en el alimentador sin bancos de capacitores es 514.972 kW y una demanda de potencia reactiva de -2486.590 kVAR. Con el banco instalado estos valores cambian a 480.137 kW y -1586.590 kVAR. Por lo tanto la reducción de pérdidas en el alimentador es de 34.836 kW y el porcentaje de caída de tensión se reduce a 7.50 %.

El segundo banco a localizar es el desconectable de 1800 kVAR. La corrida del programa muestra en la tabla V.22 que la mayor reducción de pérdidas se obtiene en el nodo 22, pero la instalación de dos bancos de capacitores en el mismo nodo no esta recomendada. Debido a esto se decidió colocar el banco en el nodo 21, siendo la diferencia entre la reducción de pérdidas en el nodo 22 y en el nodo 21 igual a 0.561 kW la cual no es

significativa. De las tablas V.21 y V.23 se ve que los valores de pérdidas y potencia reactiva demandada, con el banco fijo instalado, son de 480.137 kW y -1586.590 KVAR respectivamente. Con el banco de 1800 kVAR los valores son 461.713 kW y 213.410 KVAR. Entonces, la reducción de pérdidas de potencia es de 18.423 kW y el porcentaje de caída de tensión se reduce a 7.34 %.

En total, con los dos bancos de capacitores instalados se obtiene una reducción de pérdidas de 53.259 kW, la potencia reactiva que debe suministrar el sistema durante la carga máxima se compensa totalmente y, además, se tienen 215 KVAR capacitivos de exceso, y la reducción en el porcentaje de caída de tensión es de 0.42 %, respecto a la condición original del alimentador. El banco fijo de 900 KVAR deberá colocarse a 21710 mt del bus, antes del nodo 22 (subestación 23/6 kV Delicias). Y el banco desconectable de 1800 KVAR se instalará a 21060 mt del bus, antes del nodo 21.

La calibración del control de disparo del banco desconectable, de acuerdo con la grafica de la figura V.8, deberá hacer que el banco entre en operación cuando la demanda de potencia reactiva en el nodo 21 alcance el valor de 1000 KVAR y se desconecte para valores inferiores. Con el valor anterior se mantiene un margen de 100 KVAR entre el banco fijo y la operación del banco desconectable.

Como se propone un banco fijo para el alimentador es necesario realizar una corrida del programa con datos de condición de carga mínima, para verificar que los niveles de tensión no estén arriba del valor permisible. En la tabla V.24 se observa que la tensión en el nodo 1, con el banco de 900 KVAR en el nodo 22, es de 22.982 kV y el porcentaje de caída en el alimentador es de 2.17 %. Estos valores se encuentran dentro de los límites establecidos en este trabajo.

ALIMENTADOR CHA - 23

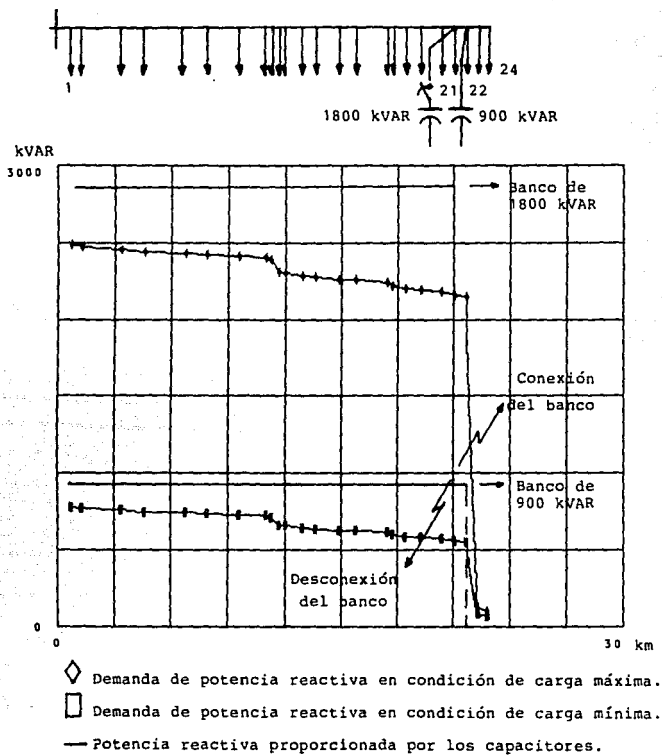


figura V.8

CHA-23 Subestacion Chalco

Condición actual del alimentador :

Tramo	Longitud (m)	S instalada (kVA)	Corriente (amp)		Pérdidas (kW)	Calda (V)	Tensión (kV)
1	700	150	179.46	-62.42 j	14.329	57.25	22.9428
2	580	113	178.22	-61.99 j	11.709	47.11	22.8956
3	2100	150	177.29	-61.66 j	41.953	169.66	22.7260
4	1200	75	176.05	-61.23 j	23.639	96.27	22.6297
5	2200	75	175.43	-61.02 j	43.033	175.88	22.4538
6	1100	75	174.81	-60.80 j	21.365	87.63	22.3662
7	1700	75	174.19	-60.59 j	32.784	134.94	22.2313
8	1400	150	173.57	-60.37 j	26.807	110.73	22.1205
9	250	673	172.33	-59.94 j	4.719	19.63	22.1009
10	400	75	166.77	-58.00 j	7.071	30.40	22.0705
11	350	150	166.15	-57.79 j	6.141	26.50	22.0440
12	950	75	164.91	-57.36 j	16.420	71.39	21.9726
13	700	120	164.29	-57.14 j	12.008	52.41	21.9202
14	1200	45	163.29	-56.80 j	39.169	109.23	21.8110
15	950	113	162.92	-56.67 j	30.867	86.28	21.7247
16	1650	203	161.99	-56.34 j	53.001	148.99	21.5757
17	300	180	160.32	-55.76 j	9.438	26.81	21.5489
18	680	45	158.83	-55.24 j	20.998	60.20	21.4887
19	850	113	158.46	-55.11 j	26.125	75.08	21.4136
20	1100	225	157.53	-54.79 j	33.413	96.59	21.3170
21	700	75	155.66	-54.14 j	20.763	60.74	21.2563
22	650	6000*	155.04	-53.93 j	19.127	56.18	21.2001
23	600	225	9.10	-3.16 j	0.061	3.04	21.1970
24	500	875	7.24	-2.52 j	0.032	2.02	21.1950

* carga conocida

Pérdidas totales del alimentador = 514.972 kW

Potencia reactiva demandada por el alimentador = -2486.590 kVAR

Calda total del alimentador = 1784.335 V

Porcentaje de calda = 7.76 %

Calda en base de 127 volts = 9.8526 V

Tabla V.18

Banco de capacitores (a instalar) localizado en nodo	Reducción de pérdidas (kW)	% de caída de tensión (%)
1	0.917	7.74
2	1.670	7.73
3	4.380	7.70
4	5.915	7.67
5	8.717	7.64
6	10.113	7.62
7	12.259	7.59
8	14.019	7.56
9	14.331	7.56
10	14.810	7.55
11	15.226	7.55
12	16.347	7.53
13	17.170	7.52
14	19.864	7.52
15	21.990	7.51
16	25.658	7.51
17	26.316	7.51
18	27.790	7.50
19	29.628	7.50
20	31.989	7.50
21	33.468	7.50
22	34.836	7.50
23	34.595	7.50
24	34.378	7.50

Tabla V.19

CHA-23 Subestación Chalco

Banco de capacitores (a instalar) de 900 kVAR localizado en el nodo => 22

Tramo	Longitud (m)	Corriente (amp)	Reducción de pérdidas (kW)	Caida (V)	Tensión (kV)	
1	700	179.46	-39.83 j	0.917	55.39	22.9446
2	580	178.22	-39.40 j	0.753	45.57	22.8990
3	2100	177.29	-39.07 j	2.710	164.09	22.7350
4	1200	176.05	-38.64 j	1.535	93.09	22.6419
5	2200	175.43	-38.42 j	2.802	170.05	22.4718
6	1100	174.81	-38.21 j	1.395	84.72	22.3871
7	1700	174.19	-37.99 j	2.147	130.45	22.2566
8	1400	173.57	-37.78 j	1.760	107.04	22.1496
9	250	172.33	-37.35 j	0.312	18.97	22.1306
10	400	166.77	-35.41 j	0.479	29.35	22.1013
11	350	166.15	-35.20 j	0.417	25.58	22.0757
12	950	164.91	-34.76 j	1.121	68.91	22.0068
13	700	164.29	-34.55 j	0.822	50.58	21.9562
14	1200	163.29	-34.20 j	2.694	105.41	21.8508
15	950	162.92	-34.07 j	2.127	83.25	21.7675
16	1650	161.99	-33.75 j	3.667	143.75	21.6238
17	300	160.32	-33.17 j	0.658	25.86	21.5979
18	680	158.83	-32.65 j	1.474	58.05	21.5399
19	850	158.46	-32.52 j	1.838	72.39	21.4675
20	1100	157.53	-32.20 j	2.361	93.12	21.3744
21	700	155.66	-31.55 j	1.480	58.54	21.3158
22	650	155.04	-31.33 j *	1.367	54.13	21.2617
23	600	9.10	-3.16 j	-0.241	3.04	21.2587
24	500	7.24	-2.52 j	-0.217	2.02	21.2566

* carga conocida

Pérdidas totales del alimentador = 480.137 kW

Reducción de pérdidas en el alimentador = 34.836 kW

Potencia reactiva demandada por el alimentador = -1586.590 kVAR

Caida total del alimentador = 1724.641 V

Porcentaje de caída = 7.50 %

Caida en base de 127 volts = 9.5230 V

Tabla V.20

CHA-23 Subestación Chalco

Condición actual del alimentador :

Banco de capacitores de 900 kVAR instalado en el nodo => 22

Tramo	Longitud (m)	S instalada (kVA)	Corriente (amp)	Pérdidas (kW)	Caida (V)	Tensión (kV)	
1	700	150	179.46	-39.83 j	13.412	55.39	22.9446
2	580	113	178.22	-39.40 j	10.956	45.57	22.8990
3	2100	150	177.29	-39.07 j	39.243	164.09	22.7350
4	1200	75	176.05	-38.64 j	22.104	93.09	22.6419
5	2200	75	175.43	-38.42 j	40.231	170.05	22.4718
6	1100	75	174.81	-38.21 j	19.970	84.72	22.3871
7	1700	75	174.19	-37.99 j	30.638	130.45	22.2566
8	1400	150	173.57	-37.78 j	25.047	107.04	22.1496
9	250	673	172.33	-37.35 j	4.407	18.97	22.1306
10	400	75	166.77	-35.41 j	6.592	29.35	22.1013
11	350	150	166.15	-35.20 j	5.724	25.58	22.0757
12	950	75	164.91	-34.76 j	15.299	68.91	22.0068
13	700	120	164.29	-34.55 j	11.186	50.59	21.9562
14	1200	45	163.29	-34.20 j	36.475	105.41	21.8508
15	950	113	162.92	-34.07 j	28.741	83.25	21.7675
16	1650	203	161.99	-33.75 j	49.334	143.75	21.6238
17	300	180	160.32	-33.17 j	8.780	25.86	21.5979
18	680	45	158.83	-32.65 j	19.324	58.05	21.5399
19	850	113	158.46	-32.52 j	24.287	72.39	21.4675
20	1100	225	157.53	-32.20 j	31.052	93.12	21.3744
21	700	75	155.66	-31.55 j	19.284	58.54	21.3158
22	650	6000*	155.04	-31.33 j	17.760	54.13	21.2617
23	600	225	9.10	-3.16 j	0.061	3.04	21.2587
24	500	875	7.24	-2.52 j	0.032	2.02	21.2566

* carga conocida

Pérdidas totales del alimentador = 480.137 kW

Potencia reactiva demandada por el alimentador = -1586.590 kVAR

Caida total del alimentador = 1724.641 V

Porcentaje de caída = 7.50 %

Caida en base de 127 volts = 9.5230 V

Tabla V.21

Banco de capacitores (a instalar) localizado en nodo	Reducción de pérdidas (kW)	% de caída de tensión (%)
1	0.618	7.48
2	1.118	7.46
3	2.891	7.41
4	3.878	7.38
5	5.662	7.33
6	6.543	7.31
7	7.884	7.27
8	8.973	7.25
9	9.162	7.24
10	9.425	7.24
11	9.651	7.23
12	10.244	7.21
13	10.673	7.20
14	12.048	7.22
15	13.124	7.23
16	14.941	7.26
17	15.254	7.27
18	15.929	7.28
19	16.762	7.30
20	17.805	7.32
21	18.423	7.34
22	18.984	7.36
23	17.834	7.37
24	16.843	7.38

Tabla V.22

CHA-23 Subestación Chalco

Banco de capacitores de 900 kVAR instalado en el nodo => 22

Banco de capacitores (a instalar) de 1800 kVAR localizado en el nodo => 21

Tramo	Longitud (m)	Corriente (amp)	Reducción de pérdidas (kW)		Calda (V)	Tensión (kV)
1	700	179.46	5.36 j	0.618	54.09	22.9459
2	580	178.22	5.79 j	0.499	44.51	22.9014
3	2100	177.29	6.11 j	1.773	160.34	22.7410
4	1200	176.05	6.54 j	0.987	90.99	22.6501
5	2200	175.43	6.76 j	1.785	166.24	22.4838
6	1100	174.81	6.97 j	0.880	82.83	22.4010
7	1700	174.19	7.19 j	1.342	127.56	22.2734
8	1400	173.57	7.41 j	1.089	104.68	22.1687
9	250	172.33	7.84 j	0.189	18.56	22.1502
10	400	166.77	9.77 j	0.263	28.76	22.1214
11	350	166.15	9.99 j	0.226	25.07	22.0963
12	950	164.91	10.42 j	0.593	67.56	22.0288
13	700	164.29	10.63 j	0.429	49.60	21.9792
14	1200	163.29	10.98 j	1.375	103.40	21.8758
15	950	162.92	11.11 j	1.076	81.68	21.7941
16	1650	161.99	11.43 j	1.817	141.08	21.6530
17	300	160.32	12.02 j	0.313	25.39	21.6276
18	680	158.83	12.53 j	0.675	57.04	21.5706
19	850	158.46	12.66 j	0.833	71.14	21.4994
20	1100	157.53	12.99 j	1.043	91.54	21.4079
21	700	155.66	13.63 j	0.619	57.59	21.3503
22	650	155.04	-31.33 j *	0.561	54.13	21.2962
23	600	9.10	-3.16 j	-1.150	3.04	21.2931
24	500	7.24	-2.52 j	-0.991	2.02	21.2911

* carga conocida

Pérdidas totales del alimentador = 461.713 kW

Reducción de pérdidas en el alimentador = 18.423 kW

Potencia reactiva demandada por el alimentador = 213.410 kVAR

Calda total del alimentador = 1688.118 V

Porcentaje de calda = 7.34 %

Calda en base de 127 volts = 9.3213 V

Tabla V.23

CHA-23 Subestación Chalco

Condición actual del alimentador :

Banco de capacitores de 900 kVAR instalado en el nodo => 22

Tramo	Longitud (m)	S instalada (kVA)	Corriente (amp)		Pérdidas (kW)	Caída (V)	Tensión (kV)
1	700	150	56.67	2.88 j	1.278	17.10	22.9829
2	580	113	55.83	3.17 j	1.028	13.96	22.9689
3	2100	150	55.19	3.40 j	3.641	49.98	22.9190
4	1200	75	54.35	3.69 j	2.019	28.13	22.8908
5	2200	75	53.92	3.84 j	3.645	51.19	22.8396
6	1100	75	53.50	3.98 j	1.795	25.40	22.8142
7	1700	75	53.08	4.13 j	2.732	38.95	22.7753
8	1400	150	52.65	4.28 j	2.215	31.83	22.7435
9	250	673	51.81	4.57 j	0.383	5.60	22.7379
10	400	75	48.02	5.89 j	0.531	8.33	22.7295
11	350	150	47.60	6.04 j	0.457	7.23	22.7223
12	950	75	46.75	6.33 j	1.199	19.29	22.7030
13	700	120	46.33	6.48 j	0.868	14.09	22.6889
14	1200	45	45.65	6.71 j	2.790	29.15	22.6598
15	950	113	45.40	6.80 j	2.186	22.96	22.6368
16	1650	203	44.76	7.02 j	3.699	39.36	22.5974
17	300	180	43.62	7.42 j	0.641	6.99	22.5905
18	680	45	42.61	7.77 j	1.393	15.51	22.5749
19	850	113	42.35	7.86 j	1.722	19.28	22.5557
20	1100	225	41.72	8.08 j	2.169	24.61	22.5311
21	700	75	40.45	8.52 j	1.306	15.23	22.5158
22	650	6000*	40.03	8.67 j	1.191	14.02	22.5018
23	600	225	6.20	-2.16 j	0.028	2.07	22.4997
24	500	875	4.93	-1.72 j	0.015	1.37	22.4984

* carga conocida

Pérdidas totales del alimentador = 38.932 kW

Potencia reactiva demandada por el alimentador = 114.759 kVAR

Caída total del alimentador = 498.086 V

Porcentaje de caída = 2.17 %

Caída en base de 127 volts = 2.7503 V

tabla V.24

VI.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base a la investigación realizada, los criterios establecidos en este trabajo y los resultados obtenidos de las soluciones desarrolladas en el capítulo V, se puede establecer lo siguiente:

1. La regulación es un importante factor calificador de la calidad del suministro y desafortunadamente está con más frecuencia que la deseada fuera de los valores adecuados.
2. En la mayor parte del Área metropolitana de la Ciudad de México la regulación es adecuada, pero existe un 15% de alimentadores, la mayoría de los cuales abastecen la periferia de la ciudad, que potencialmente pueden presentar problemas de regulación debido a su longitud. Es de esperarse que ante la carencia de recursos que impide construir suficientes subestaciones y alimentadores nuevos, así como la constante expansión de la carga en estas zonas, propicie que más alimentadores de este grupo presenten problemas de regulación de tensión.
3. Es de vital importancia analizar cuidadosamente durante la etapa de planeación los parámetros de los alimentadores, considerando como uno de los factores primordiales la caída de tensión. En especial se deben buscar los calibres y el nivel de tensión óptimos (este óptimo ya normalizado por CLYFC) para cada alimentador.
4. La reconfiguración de alimentadores debe contemplarse cuando en una zona existan problemas de sobrecarga, regulación y otros, antes de tratar de solucionar los problemas de cada alimentador individualmente. Una reconfiguración (anterior a la realización de este trabajo) de la zona servida por el alimentador CHA-23, permitió que la demanda máxima de este

descendiera de 400 Amp a su valor actual de 190 Amp y que la regulación de tensión mejorara de 14 a 7.76%.

5. No se debe descartar en futuras aplicaciones la posibilidad de emplear capacitores serie para mejorar la regulación en forma automática, ya que en líneas de distribución de longitud considerable la disminución de la reactancia de la línea reduciría notablemente la caída (en las líneas de 23 kV, la reactancia de la línea provoca por los menos el 50% de la caída de tensión).

6. A pesar de el uso difundido de capacitores en paralelo para corregir el nivel de tensión, para los casos estudiados se comprobó que estos no pueden ser usados como elementos primarios de regulación sin embargo, si son un medio muy efectivo de reducir las pérdidas en el alimentador.

7. Para los casos estudiados la aplicación de reguladores ofrece una solución satisfactoria y en general se observa que brindaran una mayor flexibilidad para corregir problemas de regulación que los demás métodos presentados en este trabajo.

8. De lo anterior se concluye que para los alimentadores CHA-21 y CHA-23 los reguladores proporcionan una solución más efectiva que los capacitores en paralelo. Debido a que las características de estos alimentadores (longitud considerable, factor de potencia bueno, de 0.9 a 0.95, carga en expansión) se repiten para otros alimentadores de la periferia, es posible que para estos otros alimentadores se obtengan resultados similares.

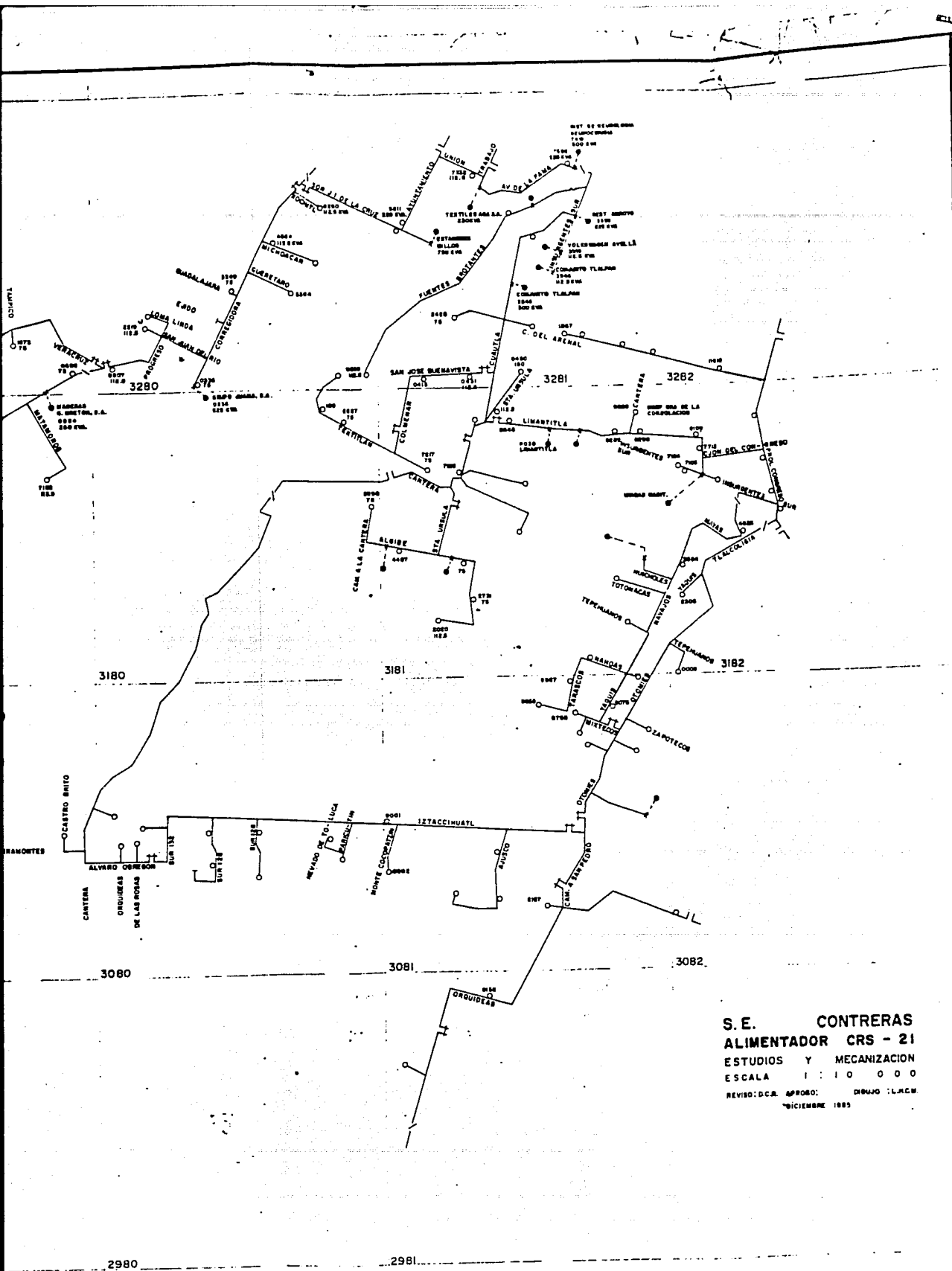
9. Los costos de los bancos de regulación seleccionados (capítulo V.3) son de \$97,308,000 para el alimentador CHA-21 y \$97,308,000 para el CHA-23. El costo aproximado del alimentador troncal para el CHA-21 es de 2,300 millones y para el CHA-23 es de 2,100 millones de pesos. De estos datos se observa que la aplicación de bancos de regulación incrementa el

costo del alimentador en 4.2% para el CHA-21 y en 4.6% para el CHA-23 por lo que se logra un incremento muy importante en la calidad del servicio con un aumento relativamente pequeño en el costo de el alimentador, por lo que es recomendable su aplicación. En la anterior estimación solo se incluye el costo del alimentador troncal. Si se realizara tomando en cuenta ramales y transformadores de distribución, el porciento de incremento seria aún menor. (Costos de febrero de 1991)

VII.- BIBLIOGRAFIA

- Alfredo Navarro Crespo
CAPACITORES DE POTENCIA
Balmeq, S.A.
1981
- Fernando Brito y H. de la Torre
APLICACION DE CAPACITORES SERIE EN REDES DE DISTRIBUCION
Artículo técnico presentado en la reunión MEXICON 83
- H. Sarmiento, A. Rodríguez, F. Brito, H. Franco y R. Vargas
APLICACION DE CAPACITORES EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION
Instituto de Investigaciones Electricas
1979
- John Harder
DISTRIBUTION CAPACITOR CONTROL - AN OVERVIEW
Artículo técnico presentado en la Power Distribution
Conference! Austin, Texas, 1986
- Juan Antonio Yebra Morón
COMPENSACION DE POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS ELECTRICOS
Ed. McGraw-Hill
1987
- Roberto Espinosa y Lara
SISTEMAS ELECTRICOS DE DISTRIBUCION
DEPFI, UNAM
1989
- Tore Petersson
REACTIVE POWER COMPENSATION
ASEA, Information
1984

- Turan Gonen
ELECTRIC POWER DISTRIBUTION SYSTEM ENGINEERING
Ed. McGraw-Hill
1987
- Compañia de Luz y Fuerza del Centro
GUIA PARA EL CALCULO DE LA LOCALIZACION OPTIMA DE BANCOS
DE CAPACITORES EN ALIMENTADORES DE DISTRIBUCION
Superintendencia de Estudios y Normalización
1984
- Cooper Power Systems
McGRAW-EDISON VR-32 REGULATOR AND CL-4B CONTROL
INSTALLATION, OPERATION AND MAINTENANCE INSTRUCTIONS
1989
- Cooper Power Systems
McGRAW-EDISON VR-32 REGULATOR AND CL-2 CONTROL
OPERATING, MAINTENANCE AND PARTS REPLACEMENT INSTRUCTIONS
1988
- Institute of Electric and Electronic Engineers
IEEE RECOMENDED PRACTICE FOR ELECTRIC POWER DISTRIBUTION
FOR INDUSTRIAL PLANTS. STD. 141-1976
- Sangamo Electric Company
LINCOLNTROL FOR AUTOMATIC CONTROL OF CAPACITOR SWITCHING,
INSTRUCTION MANUAL
- Westinghouse Electric Corporation
ELECTRIC UTILITY ENGINEERING REFERENCE BOOK,
DISTRIBUTION SYSTEMS
1965



S. E. CONTRERAS
ALIMENTADOR CRS - 21
ESTUDIOS Y MECANIZACION
ESCALA 1 : 10 000
 REVISO: D.C.R. APROBO: DIBUJO: L.L.A.C.M.
 DICIEMBRE 1985

S.E. CONTRERAS

ALIM. CRS-21

3274

3275

3276

3174

3175

3176

3177

3074

3075

3076

3077

2974

2975

2976

2977

