



D-7579

T
621.3192
T893
E.2

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

“ REGULACION DE VOLTAJE MEDIANTE EL
USO DE AUTOTRANSFORMADORES, EN
LINEAS DE DISTRIBUCION RURAL
(SISTEMA BABAHOYO 1.981)”

Informe Técnico

Previo a la obtención del Título de
INGENIERO ELECTRICO
Especialización: POTENCIA

Presentado por:
RAMON EFREN TORRES CHAVEZ

Guayaquil - Ecuador

1.987

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Jorge Flores Macías, supervisor de este informe técnico, por su colaboración en la elaboración de este trabajo, y al personal docente de la ESPOL que contribuyeron en mi formación.

DEDICATORIA

A mis Padres

A mi esposa

A mis hijas

MIEMBROS DEL TRIBUNAL



Ing. CRISTOBAL MERA G.
Presidente



Ing. JORGE FLORES M.
Director de tesis



~~ING. JORGE CHIRIBOGA V.~~
Miembro

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en este informe técnico, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual del mismo, a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).

EFREN TORRES CHAVEZ

RESUMEN

Todas las empresas eléctricas tienen como finalidad la de entregar energía eléctrica en las mejores condiciones a los distintos usuarios, sean estos residenciales, industriales, rurales, etc.

Debido a los incrementos en longitud y carga de los distintos alimentadores rurales, se presentarán problemas de regulación de voltaje al cabo de cierto tiempo de haber sido construidos estos alimentadores, razón por lo cual deben tomarse ciertas medidas tendientes a corregir este defecto de voltaje.

El presente trabajo analiza la situación crítica de ciertos alimentadores rurales, en lo concerniente a la pobre regulación de voltaje de las líneas, causado por un crecimiento rápido de la carga, así como por los excesivos incrementos en longitud realizados con el fin de servir a más usuarios en el área de concesión de la Empresa Eléctrica Los Ríos.

Después de hacer un recuento de los distintos métodos para calcular caídas de voltaje en un alimentador, se hace incapié en los efectos que sobre la vida y comportamiento de los distintos equipos eléctricos tienen las variaciones de voltaje que exceden los valores permisibles para su correcto funcionamiento.

Antes de proceder a implantar los correctivos a este problema en el sistema analizado, se hace una clasificación de los distintos métodos utilizados para mejorar la regulación de voltaje en líneas de distribución.

Habiendo llegado a la decisión de utilizar Reguladores de voltaje a pasos, se analizan las características de la línea y su comportamiento mediante el uso de perfiles de voltaje y se proceden a calcular los parámetros de la línea y del equipo regulador previo al montaje de los mismos.

Una vez instalado el equipo regulador nuevamente analizamos el comportamiento de la línea mediante el perfil de voltaje modificado para verificar la eficacia del método.

I N D I C E

RESUMEN	Pág.
	VII
INDICE GENERAL	IX
INDICE DE FIGURAS	XII
INDICE DE TABLAS	XIV
INTRODUCCION	15
<u>CAPITULO I</u>	
CAIDAS DE VOLTAJE EN LINEAS DE DISTRIBUCION	
1.1 Cálculos de voltaje y porcentajes de regulación	17
1.1.1 Regulación de voltaje	19
1.1.2 Caídas de voltaje en una línea de distribución	19
1.1.3 Tablas para el cálculo de las caídas de voltaje	23
1.2 Perfiles de voltaje	24
1.3 Características de los aparatos eléctricos como función del voltaje aplicado	26
1.3.1 Lámparas Incandescentes	27
1.3.2 Lámparas fluorescentes	28
1.3.3 lámparas de Mercurio	29
1.3.4 Resistencias eléctricas	30
1.3.5 Motores de inducción	31
1.3.6 Motores Síncronos	32
1.3.7 Equipo electrónico	32
<u>CAPITULO II</u>	
EQUIPOS DE REGULACION DE VOLTAJE	

2.1	Metodos para mejorar la regulación de voltaje	34
2.1.1	Control de voltaje de generación	34
2.1.2	Regulación de voltaje en subestaciones	35
2.1.3	Incremento del nivel de voltaje	36
2.1.4	Balaceo de cargas en el alimentador	37
2.1.5	Incremento de la sección del conductor	37
2.1.6	Instalación de Capacitores	38
2.1.6.1	Capacitores en paralelo	38
2.1.6.2	Capacitores en Serie	40
2.1.7	Instalación de Reguladores de Voltaje	41
2.2	Comparación de los métodos convencionales para mejorar la regulación de voltaje	49

CAPITULO III

ANALISIS DE LA SITUACION DEL SISTEMA BABAHOYO EN EL AÑO 1.981

3.1	Descripción del sistema Babahoyo, diagrama unifilar	53
3.2	Perfil de voltaje de la línea de distribución Babahoyo-San Juan-Puebloviejo-Ventanas	54
3.3	El Sistema Babahoyo a corto plazo	57
3.4	Equipo disponible para superar el problema	58

CAPITULO IV

UTILIZACION DE AUTOTRANSFORMADORES PARA MEJORAR LA REGULACION DE VOLTAJE EN EL SISTEMA BABAHOYO

4.1	Instalación típica para un Banco de Reguladores	59
4.2	Modo de instalación propuesto	61
4.3	Cálculo de los parámetros de la línea y dimensionamiento del banco	62

4.4	Calibración de los parámetros del regulador	64
4.4.1	Ubicación del punto de instalación de los reguladores	64
4.4.2	Nivel de voltaje	66
4.4.3	Ancho de Banda	67
4.4.4	Retardo de tiempo	67
4.4.5	Compensador de caída en la línea	67
4.4.6	Perfil de voltaje obtenido con la instalación del banco de reguladores	69
4.5	Procedimiento general para el montaje del equipo	71
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
	ANEXO	75
	BIBLIOGRAFIA	76

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Ramal de distribución típico	18
2. Diagrama vectorial	21
3. Caídas de voltaje para varios tipos de distribución de carga	22
4. Diagrama unifilar típico de un alimentador residencial	24
5. Perfil de voltaje para un alimentador residencial típico	25
6. Alimentador rural típico	26
7. Influencia de las variaciones de tensión sobre las características de funcionamiento nominales de las lámparas incandescentes	27
8. Características de las lámparas fluorescentes como función del voltaje aplicado	28
9. Curvas características de una lámpara de vapor de mercurio	30
10. Características de un motor de inducción en función del voltaje aplicado	31
11. Perfil de voltaje de un mismo alimentador con y sin regulación en la subestación	36
12. Perfil de voltaje para condiciones actuales y futuras	43
13. Localización del regulador en un alimentador con carga distribuida	43
14. Diagrama simplificado del circuito de control y LDC de un regulador	48
15. Diagrama unifilar del sistema Babahoyo al año 1.981	53
16. Perfil de voltaje de la línea Babahoyo-San Juan_Pueblo_viejo-Ventanas	56
17. Diagrama unifilar del sistema Babahoyo para el año 1.984	57
18. Tres reguladores en un circuito 3ϕ -Y, 4 hilos	59

19.	Instalación típica de un banco de reguladores	60
20.	Típica instalación monofásica	61
21.	Espaciamiento de los conductores en la línea	62
22.	Localización del banco de reguladores	64
23	Panel de control, vista de frente	65
24.	Perfil de voltaje con el banco de reguladores instalado	69

INDICE DE TABLAS

	Pág.
I Valores permisibles de voltaje	18
II Funciones ejecutadas por capacitores y reguladores de voltaje a pasos	52
III Valores de voltaje secundario tomados a lo largo de la línea	55
IV Relaciones de potencial estándares	67

INTRODUCCION

Siendo la energía eléctrica uno de los elementos indispensables para el desarrollo de cualquier actividad productiva, así como primordial factor de integración social del ser humano, es menester que su producción esté enmarcada dentro de ciertos parámetros técnicos que permitan hacer de su uso algo aceptable.

Todos los fabricantes de equipos eléctricos, sean electrodomésticos, motores, luminarias, equipo electrónico, etc., suministran al consumidor las especificaciones de voltaje de utilización del equipo, entendiéndose que tales aparatos tendrán su funcionamiento óptimo a tales valores.

Como sabemos, es imposible mantener en un sistema de distribución un voltaje constante, debido a las variaciones de carga, a las perturbaciones en las líneas, etc., razón por la cual las empresas eléctricas encargadas de entregar este fluido tienen que arbitrar los correctivos necesarios para tratar de mantener un valor del voltaje de entrega lo más estable posible y dentro de los márgenes aceptados técnicamente.

El presente trabajo tiene como meta analizar los diferentes criterios técnicos para lograr una buena regulación de voltaje en líneas de distribución rural, estudiando el comportamiento de los aparatos existentes para este fin, como capacitores, reguladores, etc.

Una vez realizado este análisis se hace una comparación de los métodos usuales con el fin de establecer la conveniencia de uno o de otro.

CAPITULO I

CAIDAS DE VOLTAJE EN LINEAS DE DISTRIBUCION

1.1 CALCULOS DE VOLTAJE Y PORCENTAJES DE REGULACION

El primer objetivo en el diseño de un sistema de distribución es el de suministrar a cada uno de los usuarios, un voltaje que esté de acuerdo al voltaje de utilización del equipo eléctrico. Todo equipo eléctrico está diseñado para su uso a un determinado voltaje, el cual se denomina voltaje de placa.

Es económicamente imposible suministrar a cada usuario de un sistema de distribución un voltaje de utilización igual al voltaje de placa de su equipo, ya que existen caídas de voltaje en cada una de las partes constitutivas de un sistema de potencia, desde la generación hasta el cableado interior del consumidor.

La caída de voltaje es proporcional a la magnitud y ángulo de fase de la corriente de carga que fluye a través del sistema de potencia. Esto significa que los usuarios que se encuentran más cercanos a la fuente deberían recibir un voltaje más elevado que los usuarios más distantes de la fuente.

Considerando que los aparatos eléctricos son prácticamente similares para todos los consumidores, es necesario suministrar un vol-

taje igual para cada uno de ellos.

Se ha establecido un margen de variación arriba y abajo del valor del voltaje de placa al cual se puede obtener un funcionamiento satisfactorio del equipo eléctrico. Si las empresas eléctricas mantuvieran un margen de variación demasiado ancho, esto redundará en un elevado costo para los artefactos y equipo eléctrico, ya que estos tendrían que ser diseñados para operar satisfactoriamente a cualquier voltaje dentro de este margen. Por otro lado, si este margen fuera demasiado estrecho, el costo de producir energía eléctrica sería demasiado alto.

Para un sistema de distribución (Fig. 1) a 13.200 V, las variaciones permisibles en los distintos puntos, están dadas en la Tabla I.

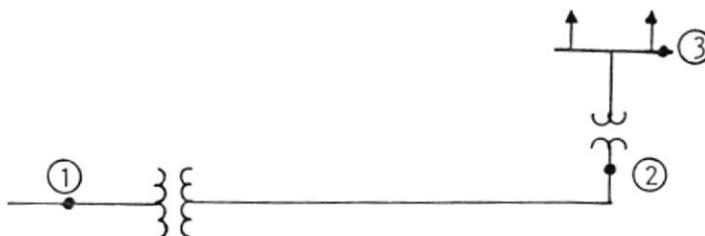


Fig. 1 Ramal de distribución típico

TABLA I VALORES PERMISIBLES DE VOLTAJE

Ubicación	Valor Nominal	Valor Tolerable	
		Mínimo	Máximo
1.- Voltaje en subestaciones	7620/13200Y	7000/12100Y	8320/14500Y
2.- Voltaje en el primario de transf. de distrib.	7620/13200Y	7000/12100Y	8250/14300Y
3.- Voltaje en el punto de utilización	120/240	107/214	127/254

1.1.1 Regulación de Voltaje

La regulación de voltaje es el porcentaje de la caída de voltaje de una línea con relación al voltaje de envío y de recepción.

$$\text{Porcentaje de regulación} = \frac{|E_s| - |E_r|}{|E_r|} \times 100 \quad (1)$$

Donde : E_s = Voltaje final de envío

E_r = Voltaje final de recepción

1.1.2 Caídas de Voltaje en una Línea de Distribución

Cuando las características eléctricas de la línea bajo consideración han sido determinadas, la caída en la línea para una carga de tipo concentrada de factor de potencia θ , puede ser calculada de la ecuación.

$$\text{Caída de voltaje} = I (R \cos \theta + X \text{ Sen } \theta) \quad (2)$$

Donde R y X son respectivamente, la resistencia y la reactancia de un conductor de la línea bajo consideración.

Cuando las condiciones en el punto de envío son conocidas, la siguiente ecuación dará el voltaje aproximado de recepción:

$$V_{rn} = V_{sn} - I (R \cos \theta + X \text{ Sen } \theta) \quad (3)$$

Donde : V_{rn} = Voltaje de recepción fase-neutro

V_{sn} = Voltaje de envío fase-neutro

En cálculos de caídas de voltaje es conveniente expresar la caída de voltaje en porcentaje del voltaje de recepción. Dividiendo la ecuación (3) para 1.000 cambiamos voltios a Kilovoltios y multiplicando por $\sqrt{3}$ cambiamos voltajes de fase-neutro a voltajes de fase-fase; tenemos de la Ecuac.(1) :

$$\begin{aligned} \% \text{ Caída de Voltaje} &= \frac{V_s - V_r}{V_r} \times 100 \\ &= \frac{\sqrt{3} I (R \cos \theta + X \text{ Sen } \theta)}{10 \text{ KV}} \end{aligned}$$

$$\text{Sustituyendo : } I = \frac{\text{KVA}}{\sqrt{3} \text{KV}}$$

$$\% \text{ Caída de Voltaje}_{3\phi} = \frac{\text{KVA} (R \cos \theta + X \text{ Sen } \theta)}{10 \text{ KV}^2} \quad (4)$$

Donde : KVA = KVA trifásicos

KV = Kilovoltios línea a línea

Para un circuito monofásico tenemos que la caída de voltaje es el doble de dicho valor, es decir:

$$\% \text{ Caída de Voltaje}_{1\phi} = \frac{\text{KVA} (R \cos \theta + X \text{ Sen } \theta)}{5 \text{ KV}^2} \quad (5)$$

Podemos ver del diagrama vectorial de la Fig. 2, que ambas fórmulas son aproximadas, pero bastante exactas para cálcu-

los prácticos.

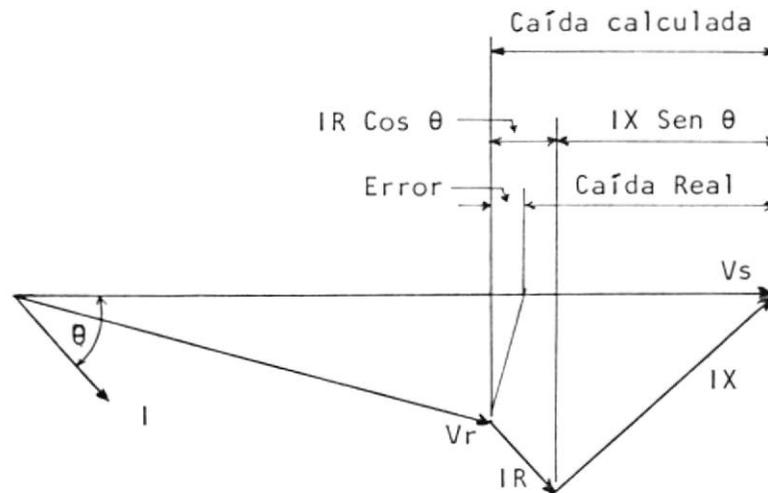


Fig. 2 Diagrama Vectorial

En este diagrama, θ es el ángulo del factor de potencia en la estación al final del alimentador, debido a que en algunos casos éste es el único lugar en el cual puede medirse el factor de potencia de la carga.

En la práctica, las cargas están usualmente distribuidas a lo largo del alimentador y no concentradas al final del mismo. Cuando se presenta este caso, a menudo podemos asumir ciertas simplificaciones.

En la Fig. 3, hemos representado algunas de ellas. Por Ejemplo, si una carga es uniformemente distribuida sobre el alimentador, la caída al final de la línea es la misma que si

la carga total estuviera concentrada en un punto a la mitad del alimentador.

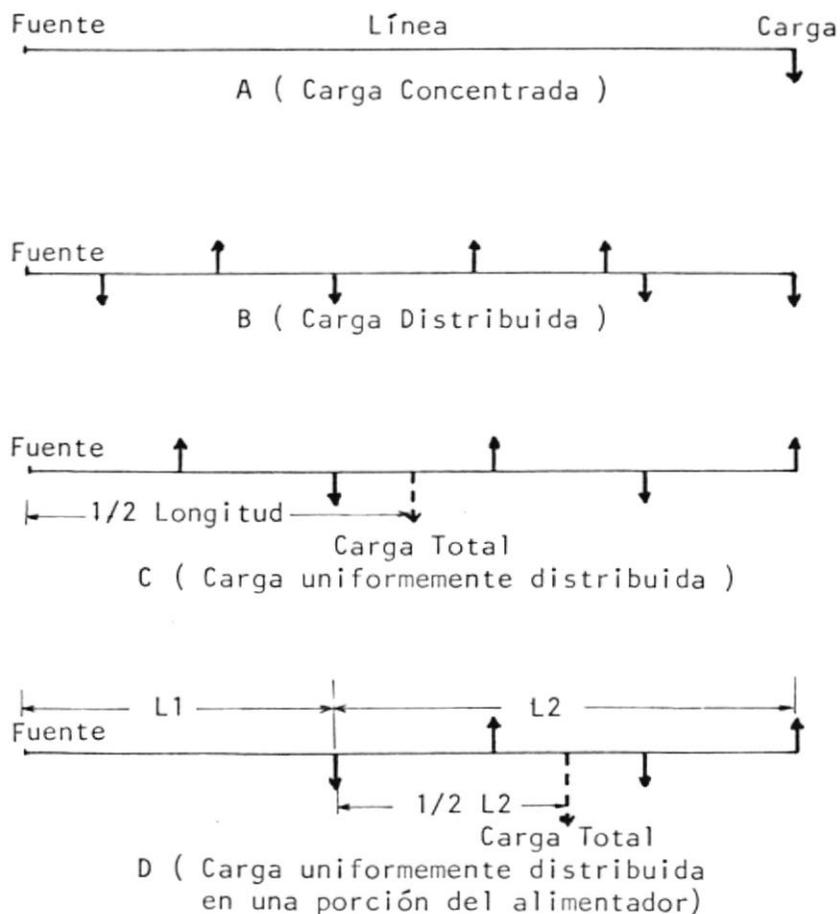


Fig. 3 Caídas de Voltaje para varios tipos de distribución de carga

Esto es matemáticamente correcto para un gran número de cargas. Para un pequeño número de cargas distribuidas el error puede ser grande. Cuando la carga puede ser dividida en un determinado número de cargas grandes concentradas, distri -

buidas a lo largo de la línea, es posible dividir la línea en secciones entre cargas para propósitos de cálculo, y con siderar cada sección individualmente con la carga que ella transporta.

Si tenemos una carga uniformemente distribuida en una línea y deseamos encontrar la caída de voltaje en algún punto de la línea, podemos utilizar la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Caída de Voltaje} = \frac{\text{KVA}(\text{R} \cos \theta + \text{X} \text{ Sen } \theta)}{10 \text{ KV}^2} L_1 \left(1 - \frac{L_1}{2L}\right) \quad (6)$$

Donde: KVA = Carga total trifásica en la línea de longitud L

R = Resistencia pr 1.000 pies

X = Reactancia por 1.000 pies

L₁ = Distancia desde la fuente al punto deseado en miles de pies

L = Longitud total de la línea en miles de pies

1.1.3 Tablas para el cálculo de las caídas de Voltaje

Las caídas de voltaje para líneas aéreas pueden ser rápidamente estimadas por simple cálculo y uso de de las tablas "amperios-pie". La tablas (anexo 1), nos permitencalcular la diferencia absoluta en voltaje, entre los voltajes línea a neutro del voltaje de envío y el de recepción, para un circuito trifásico por cada 100.000 amperios-pie de carga combinada y longitud de la línea.

1.2 PERFILES DE VOLTAJE

Los alimentadores en las zonas rurales difieren de los alimentadores residenciales en que no hay secundario como regla general, ya que existe mucha distancia entre consumidores, cada usuario tiene su propio transformador de distribución, el mismo que usualmente es de pequeña capacidad. Un diagrama unifilar de un típico alimentador residencial se muestra en la Fig. 4

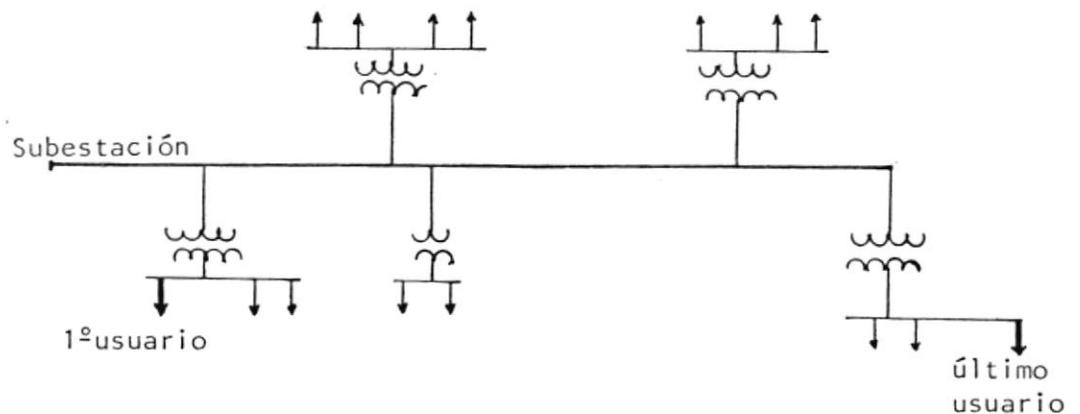


Fig. 4 Diagrama unifilar típico de un alimentador residencial.

En alimentadores rurales por lo general el transformador de distribución se ubica en un sitio centrado de las propiedades y fincas, de allí que la caída de voltaje en las acometidas es mayor que para los usuarios residenciales. Además un alimentador rural es de mayor longitud que uno residencial y en muchos casos se subdivide en tramos monofásicos en distintos sentidos.

La Fig. 5, nos presenta un perfil de voltaje para un alimentador residencial.

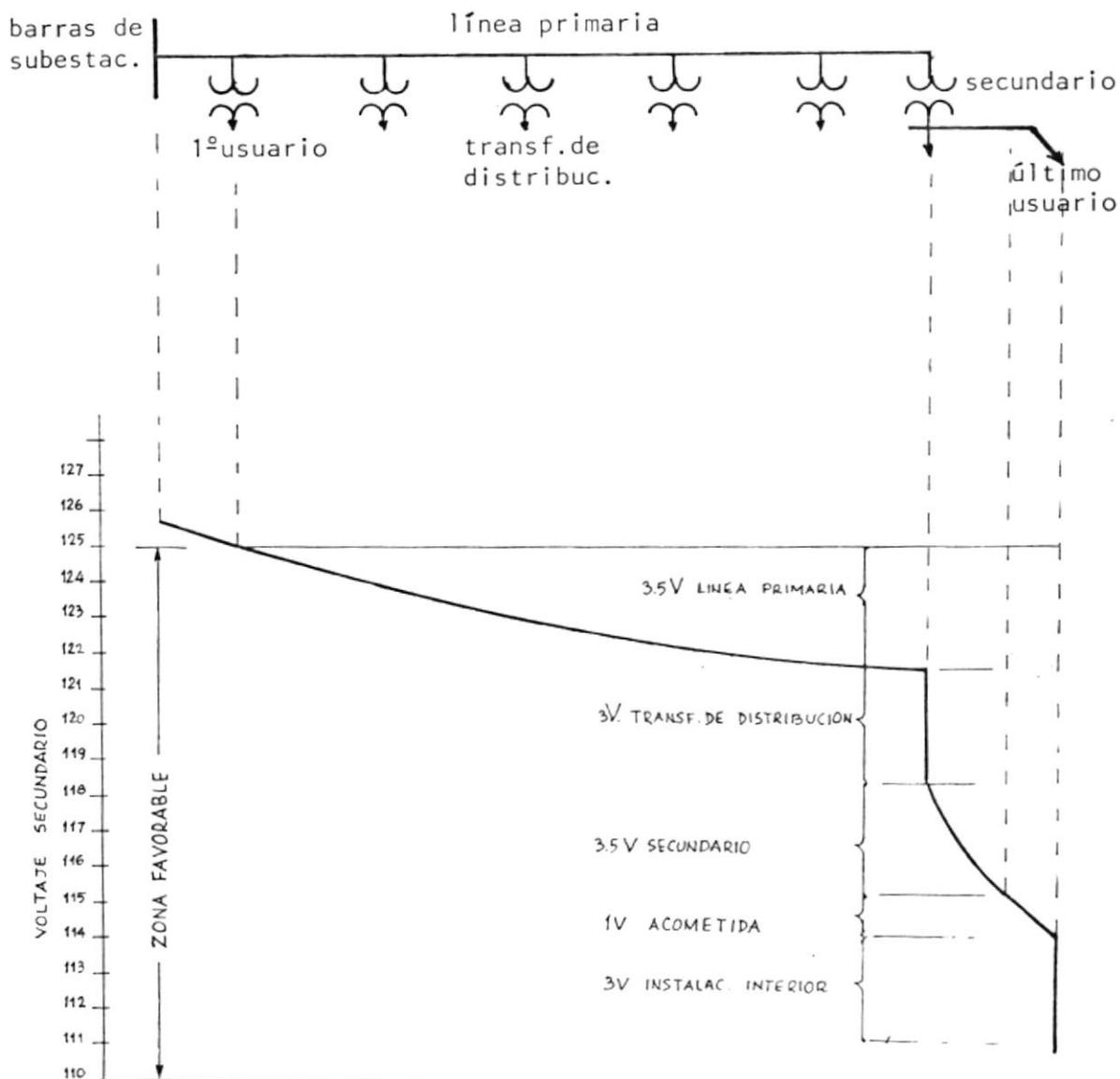


Fig. 5 Perfil de voltaje para un alimentador residencial típico.

En un alimentador rural podemos obtener un perfil de voltaje a lo lar-

go del primario, ya que además de los transformadores que sirven a los usuarios ubicados en la cercanía de el, por lo general existen acometidas laterales de relativa longitud, monofásicas o trifásicas. La Fig. 6 nos muestra un alimentador rural típico.

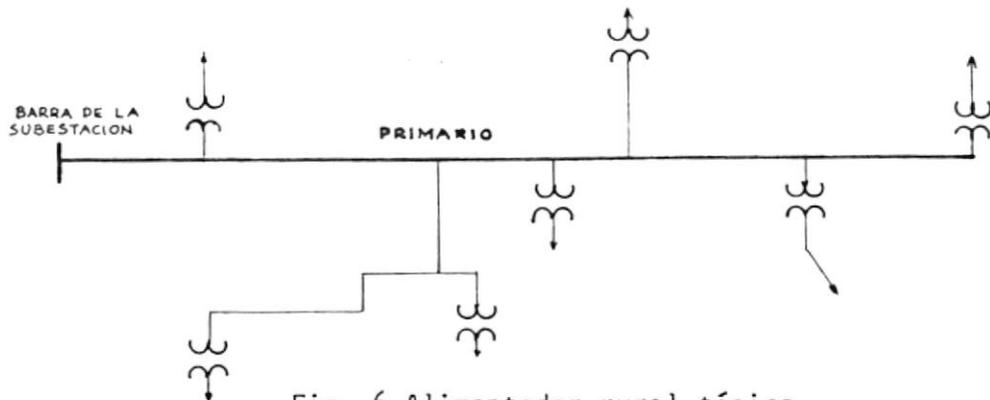


Fig. 6 Alimentador rural típico.

1.3 CARACTERISTICAS DE LOS APARATOS ELECTRICOS COMO FUNCION DEL VOLTAJE APLICADO.

La importancia de mantener un voltaje dentro de ciertos límites y que esté de acuerdo a los voltajes nominales de los artefactos y equipos eléctricos, se refleja en las características de funcionamiento y en la vida útil del equipo. Así por ejemplo ciertos aparatos que son de uso continuo y bajo cualquier condición de carga, ligera o pesada, tiene un voltaje de diseño igual al voltaje nominal del sistema. Los aparatos de poco uso y relativamente altas demandas tienen un voltaje de diseño ligeramente inferior al nominal. A continuación veremos el comportamiento de los más usuales equipos eléctricos:

1.3.1 Lámparas Incandescentes

La intensidad luminosa y la vida útil de una lámpara incandescente son afectadas considerablemente por las variaciones del voltaje aplicado.

En la Fig. 7 se muestran las curvas características para una lámpara de gran uso, la de filamento de tungsteno, llenada con gas.

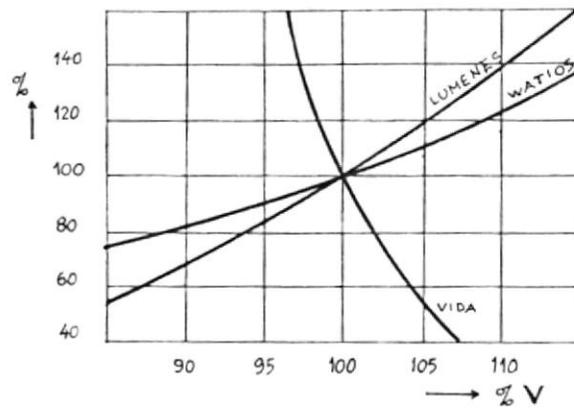


Fig. 7_Influencia de las variaciones de tensión (en % V) sobre las características de funcionamiento nominal de las lámparas incandescentes.

Ref : Manual Alumbrado PHILIPS.

Como se observa una reducción del 10% en el voltaje de la lámpara, reduce su luminosidad a un 70% (lúmenes) y reduce también el consumo de potencia en alrededor del 85% del nominal.

Esta diferencia del 15% debería ingresar a la empresa eléctrica. La vida teórica de la lámpara se incrementaría a un 350%.

En cambio con un aumento del 10% del voltaje, la vida útil se reduce al 30% del tiempo esperado.

1.3.2 Lámparas Fluorescentes

Las curvas características para las lámparas fluorescentes como función del voltaje aplicado al balastro, se muestra en la Fig. 8.

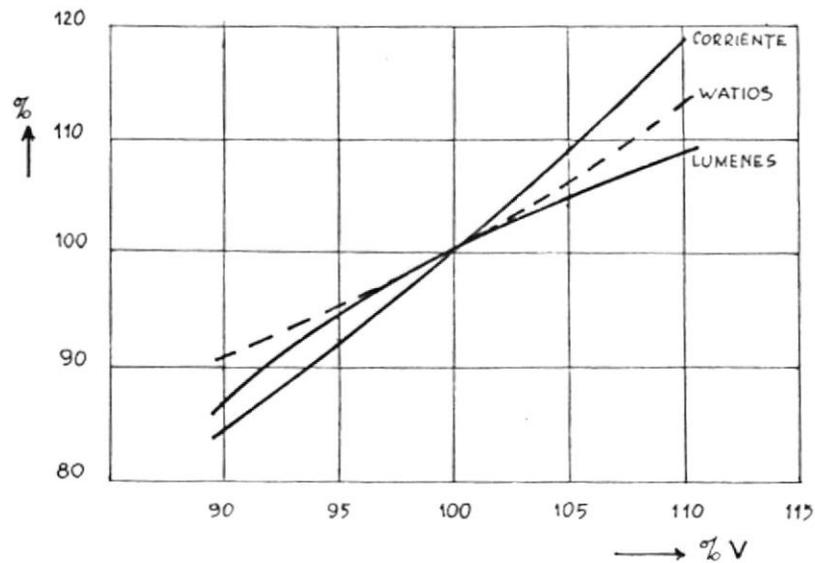


Fig.8 Características de las lámparas fluorescentes como función del voltaje aplicado.

Ref : Hand book for Electric Engineers.

El efecto del voltaje en los lúmenes de salida es menos en las lámparas fluorescentes. En general, para un cambio del + 1% en el voltaje, corresponde un cambio en lúmenes de + 1%.

El voltaje es un factor importante en el arranque de una lámpara fluorescente ya que el mismo será incierto para voltajes menores al 90% del voltaje nominal. En cambio un exceso de voltaje del 5 al 10% producirá recalentamiento en el balastro.

La vida efectiva de la luminaria será disminuída ya sea con voltajes mayores así como con voltajes menores al nominal.

1.3.3 Lámparas de Mercurio

Las luminarias de vapor de mercurio son usadas extensamente en iluminación de plantas industriales y en alumbrado público. Estas lámparas trabajan usualmente a una tensión de régimen de 120 V a 150 V, según la potencia, por lo tanto pueden conectarse a la red de 220 V y el aparato de alimentación es del tipo llamado de reactancia (balastro).

En la Fig. 9 se han representado las variaciones en tanto por ciento de las características de la lámpara en función de las variaciones en tanto por ciento de la tensión de la red.

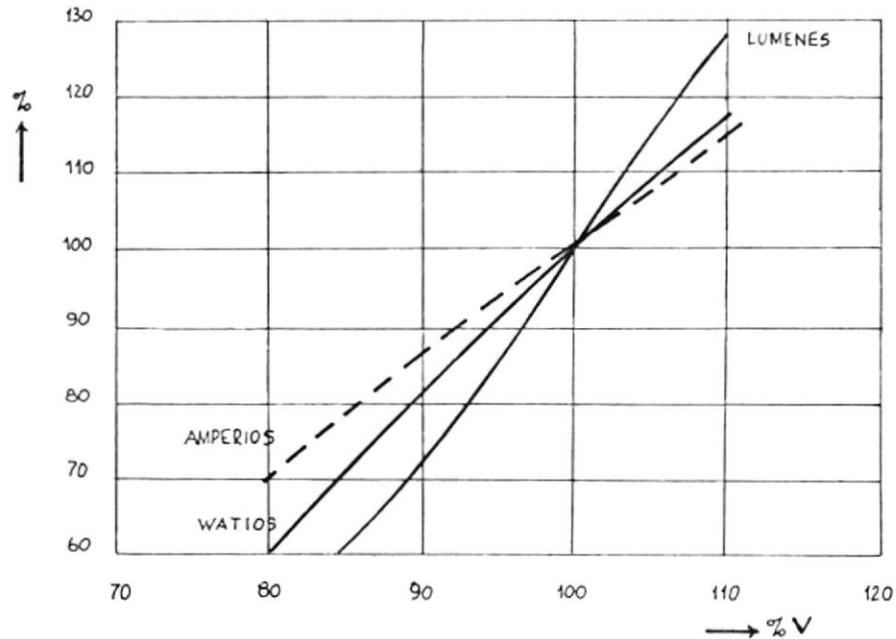


Fig. 9 Curvas características de una lámpara de vapor de mercurio.

1.3.4 Resistencias Eléctricas

En este rubro podemos considerar los diversos artefactos eléctricos como : planchas eléctricas, hornos, secadoras, equipo de calefacción para el hogar y equipo industriales de calefacción.

La energía de entrada a los calentadores varía con el cuadrado del voltaje aplicado, entonces el calor entregado por el aparato variará en la misma proporción.

Las variaciones del voltaje en aparatos de uso doméstico no

son muy importantes, ya que ésta se presenta únicamente en el corto tiempo de uso de tales artefactos.

Debido a que el tiempo que necesita una resistencia eléctrica es inversamente proporcional al voltaje aplicado, en las plantas industriales un bajo voltaje de entrega puede afectar ostensiblemente la producción, al necesitarse mas tiempo para obtener el calor deseado.

1.3.5 Motores de Inducción

Las características de los motores de inducción en función del voltaje aplicado, se muestran en la Fig. 10

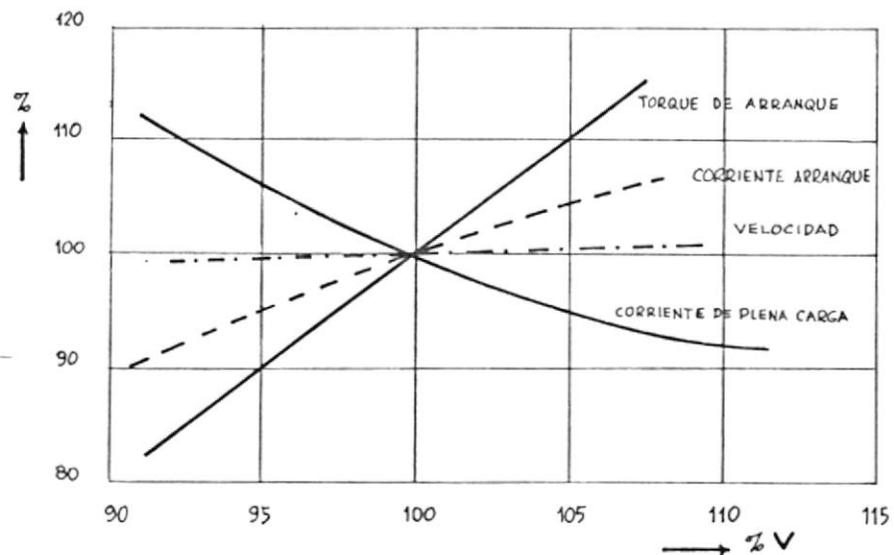


Fig. 10 Características de un motor de inducción en función del voltaje aplicado.

Cuando el voltaje cae del valor nominal, el torque disminuye -

sustancialmente, ya que varía con el cuadrado del voltaje aplicado. Esta reducción del torque es de importancia en máquinas de alta inercia impulsados por motores con plena carga y bajo voltaje, ya que la temperatura a plena carga del motor se incrementa, causando una reducción de la vida del aislamiento.

Por otro lado un voltaje muy elevado origina torques de arranque elevados con elevada punta de corriente, lo cual puede originar bajones de voltaje y parpadeo en luminarias.

La velocidad varía [?] muy poco con los cambios de voltaje.

1.3.6 Motores Síncronos

Los efectos de las variaciones de voltaje en motores síncronos, son similares a la de los motores de inducción. Sin embargo el mismo torque varía con el voltaje, en comparación con el motor de inducción, en el cual el torque de arranque varía con el cuadrado del voltaje.

1.3.7 Equipo Electrónico

Cualquier desviación del voltaje aplicado afecta seriamente la vida y características de funcionamiento de las tarjetas electrónicas.

En la actualidad, con el uso de minicomponentes también se observa una tendencia a acortar el rango de variación que puede

soportar el equipo, de allí el uso extensivo de reguladores de voltaje domésticos para proteger cualquier tipo de artefacto que incluya circuitos electrónicos.

Los equipos electrónicos mas sofisticados como los computadores incluyen dentro de sus componentes sus propios reguladores de voltaje.

CAPITULO II

EQUIPOS DE REGULACION DE VOLTAJE

2.1 METODOS PARA MEJORAR LA REGULACION DE VOLTAJE

Existen varios métodos para mejorar la regulación de voltaje en un sistema de distribución. Unos incrementan el voltaje en el inicio del alimentador de distribución, otros lo hacen reduciendo la impedancia de la línea. También se puede reducir la corriente de carga consiguiendo con esto la disminución de la caída de voltaje.

Equipos de regulación de voltaje se pueden instalar en los alimentadores donde el voltaje puede llegar a ser alto o demasiado bajo.

Los distintos métodos para conseguir esto, son listados y descritos brevemente a continuación.

2.1.1 Control del Voltaje de Generación

Sin lugar a dudas el método más barato para obtener control de voltaje es variando la corriente de campo del generador cuando éste alimenta directamente al sistema de distribución, logrando obtener un voltaje constante en el centro de la carga, para cualquier condición de la misma.

En grandes sistemas, la regulación de voltaje por control del voltaje de generación se la utiliza solamente para mantener el voltaje de barra para condiciones de carga predor-

minantes y para suministrar el flujo de potencia reactiva - requerido.

2.1.2 Regulación de Voltaje en Subestaciones

Usualmente un diseño de un sistema de distribución, debería contar con equipo de regulación en las subestaciones.

Esto se consigue utilizando :

- a) Transformadores con LTC (cambiadores de taps con carga)
- b) Reguladores entre el transformador y la barra de bajo voltaje.
- c) Conectando capacitores en la barra de bajo voltaje
- d) Instalando reguladores en cada uno de los alimentadores que salen de la subestación.

Sin equipo de regulación en la subestación, el voltaje de dispersión en el lado de la entrada de la subestación se trasladará al alimentador, esto se ilustra en la Fig. 11.

Ya que la caída de voltaje permisible en un alimentador es la diferencia entre el voltaje de dispersión al final del alimentador y el voltaje de dispersión a la salida de la subestación, la instalación de reguladores en la subestación permite un incremento en la caída de voltaje del alimentador, y consecuentemente se puede aumentar la carga del mismo.

El voltaje máximo de salida en la subestación está limitado por el usuario mas cercano.

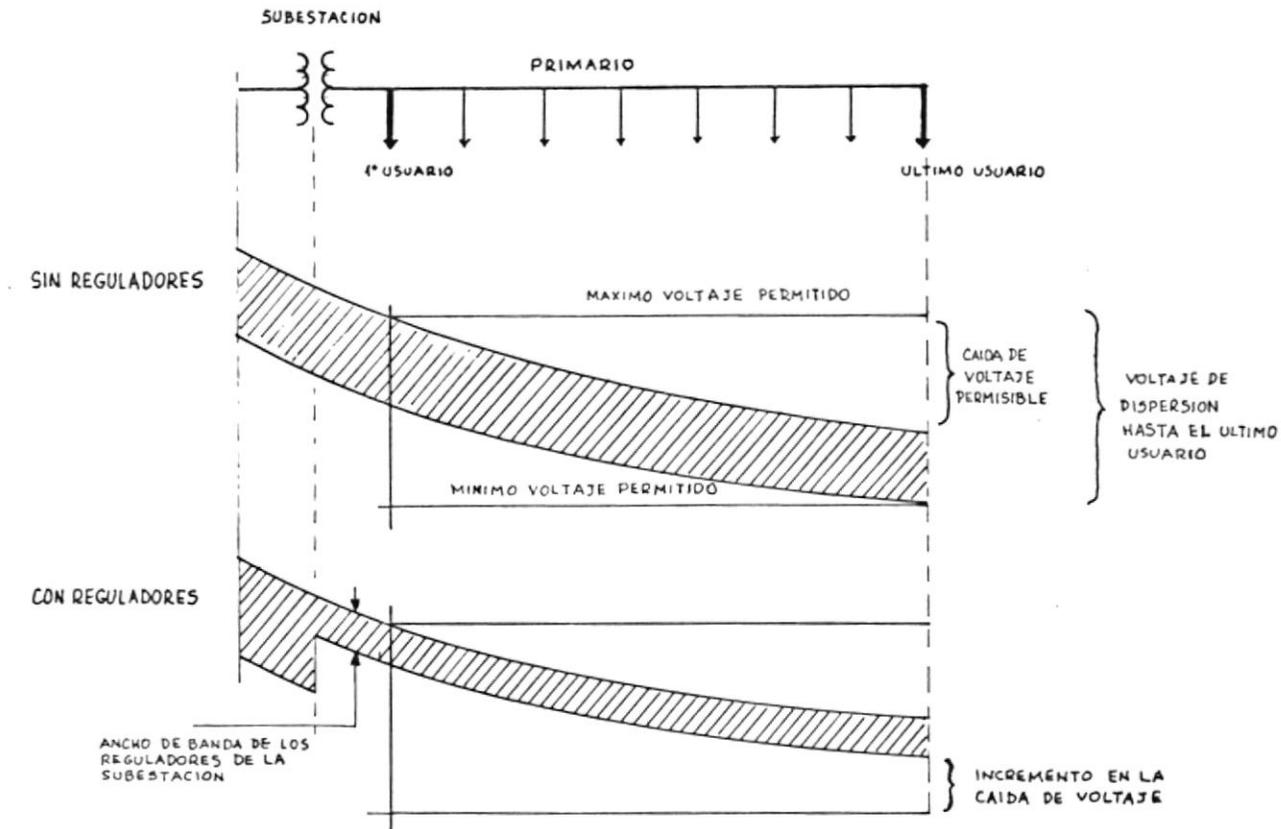


Fig. 11 Perfil de voltaje de un mismo alimentador con y sin regulación en la subestación.

2.1.3 Incremento del Nivel de Voltaje

Cuando se incrementa el nivel de voltaje primario de un alimentador y se mantiene la misma carga, la corriente de línea variará en relación inversa al cambio de voltaje, y la regulación de voltaje variará con el cuadrado del cambio de voltaje.

Aumentar el nivel del voltaje primario es un método caro para mejorar la regulación de voltaje. Una planificación adecuada, disponibilidad de terrenos para las subestaciones y un crecimiento de la carga de acuerdo a esa planificación son los factores que determinan cuando es necesario un incremento del nivel de voltaje.

2.1.4 Balanceo de cargas en el alimentador

En un alimentador primario con pobre regulación de voltaje, una de las cosas que hay que hacer primero es chequear la carga en cada una de las tres fases. Si la carga en el alimentador no está balanceada, significa que hay que llevar a cabo el balanceo en las fases.

El balanceo de cargas debe llevarse a cabo a lo largo de todo el alimentador, y no conforme a los valores de las corrientes de línea a la salida del alimentador.

Si un alimentador trifásico sirve a varias áreas monofásicamente, es necesario seleccionar tales áreas de tal manera que la carga en cada una de las fases del alimentador sea parecida.

2.1.5 Incremento de la sección del conductor

Incrementando la sección del conductor del alimentador, se

disminuye la impedancia y en consecuencia, para una misma carga, disminuye la caída de voltaje.

Cambiar los conductores de una línea para mejorar la regulación de voltaje es uno de los métodos más caros, pero a menudo es necesario hacerlo, especialmente en sistemas con crecimiento alto de usuarios.

2.1.6 Instalación de Capacitores

2.1.6.1 Capacitores en paralelo

Un banco de capacitores conectado en paralelo en un sistema de distribución, causará una elevación del voltaje desde el punto donde está localizado el banco, hacia la fuente.

Se debe chequear el punto de instalación de los capacitores para estar seguros de que el voltaje en determinados usuarios no se elevará demasiado en períodos de baja carga, ya que la elevación del voltaje es independiente de las condiciones de la carga, y es mayor en el punto de localización del banco, disminuyendo a un valor constante hacia la fuente.

La ecuación del porcentaje de elevación del volta

je, debido a la instalación de capacitores en paralelo, despreciando la resistencia de la línea es:

$$\% \Delta E = \frac{CKVA \cdot X \cdot d}{10 KV^2} \quad (7)$$

Donde: CKVA = KVAR del banco

X = Reactancia de la línea por conductor, en Ohmios por unidad de longitud

d = Distancia, en unidades de longitud

KV = Kilovoltios línea a línea

Para circuito monofásicos hay que multiplicar por 2 el valor de la reactancia.

Los capacitores fijos, a pesar de suministrar un incremento constante en nivel de voltaje, no son muy apreciados para mejorar la regulación de voltaje, ya que el incremento de voltaje es el mismo tanto para baja carga, como para la carga pico.

Si los capacitores son instalados en un banco que pueda ser conectado y desconectado automáticamente con las variaciones de carga (conectados en la carga pico y desconectados en carga baja), entonces obtendremos una mejor regulación de voltaje en el alimentador.

Los capacitores también pueden conectarse en paralelo a la barra de bajo voltaje de la subestación de distribución, pero generalmente el propósito no es necesariamente controlar voltaje, sino suministrar potencia reactiva para descargar la capacidad de la subestación y de las líneas de distribución.

2.1.6.2 Capacitores en Serie

Cuando instalamos capacitores en serie en un alimentador primario, obtendremos una reducción de la caída de voltaje.

Como vimos anteriormente, en la Ecuac.(2), la caída de voltaje de un alimentador es aproximadamente:

$$\begin{aligned}\text{Caída de voltaje} &= I(R \cos \theta + X \text{ Sen } \theta) \\ &= IR \cos \theta + IX \text{ Sen } \theta\end{aligned}$$

Con un capacitor en serie insertado en el alimentador primario, la caída de voltaje viene a ser:

$$\text{Caída de Voltaje} = IR \cos \theta + I(X - X_c) \text{ Sen } \theta \quad (8)$$

Donde X_c es la reactancia capacitiva.

Si X_c se iguala a X , la caída de voltaje es simplemente $IR \cos \theta$. Como podemos ver, aquí el efecto de

los capacitores en serie es el de reducir la reactancia del circuito.

El factor de potencia de la corriente de carga a través del alimentador debe estar para que un capacitor en serie disminuya la caída del voltaje apreciablemente entre los puntos de envío y recepción.

Si el factor de potencia está adelantado, el voltaje de recepción sería disminuído por la conexión de los capacitores en serie. Si el factor de potencia es cercano a la unidad, $\text{Sen } \theta$ y consecuentemente el segundo término de la ecuación (7) se aproximan a cero, en tales circunstancias los capacitores en serie tienen comparativamente poco valor.

2.1.7 Instalación de Reguladores de Voltaje

Los reguladores de inducción fueron los primeros tipos de reguladores de voltaje automáticos usados en sistemas de distribución. Su uso prácticamente ha desaparecido en los últimos años debido al menor costo e igual confianza en el uso de los reguladores de pasos, y al aumento de los niveles de voltaje y capacidad de la líneas de distribución.

El regulador de voltaje a pasos consiste de un autotransformador y un mecanismo de cambio de tap con carga, construído

como una sola unidad.

El cambio de voltaje se obtiene cambiando los taps del auto transformador. Los reguladores normales tienen un rango de regulación de $\pm 10\%$ y los mas modernos tienen este rango de regulación dividido ya sea en pasos de $5/8$ o $1^{1/4}$ por ciento.

El tamaño de un regulador depende de la carga que el pueda transportar y del porcentaje del voltaje de regulación. Entonces es necesario primero determinar la localización apropiada para el regulador.

Para determinar esta localización es aconsejable considerar la proyección de la carga futura así como actual.

Si se realiza un perfil de voltaje basado en una razonable proyección de la carga futura y se la compara con el perfil de voltaje basado en la carga presente, se puede obtener una determinación razonable del control de voltaje requerido con el tiempo. Un regulador que es dimensionado y localizado de acuerdo a este procedimiento suministrará una corrección del voltaje apropiado para las condiciones de carga presente y futura. Ver Fig. 12.

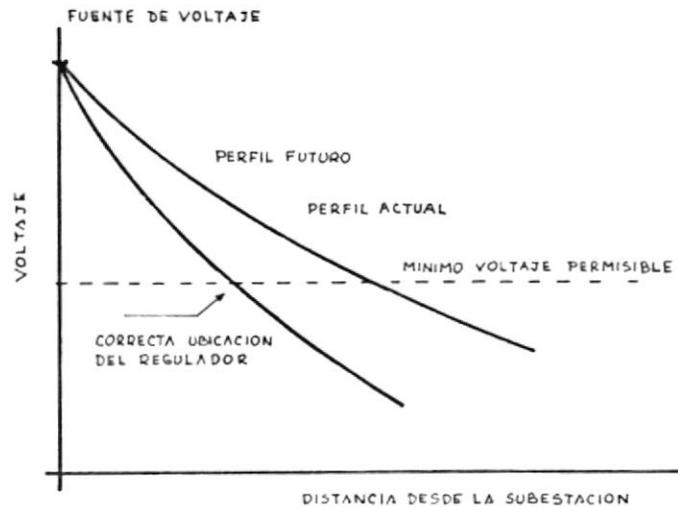


Fig. 12 Perfil de voltaje para condiciones actuales y futuras.

En alimentadores primarios donde la carga es distribuída a lo largo de toda la línea a menudo no se puede obtener un punto de referencia en donde el voltaje debe mantenerse constante. Para tales alimentadores es aconsejable obtener los perfiles de voltaje a carga pico y a baja carga desde el primer usuario al último, Ver Fig. 13.

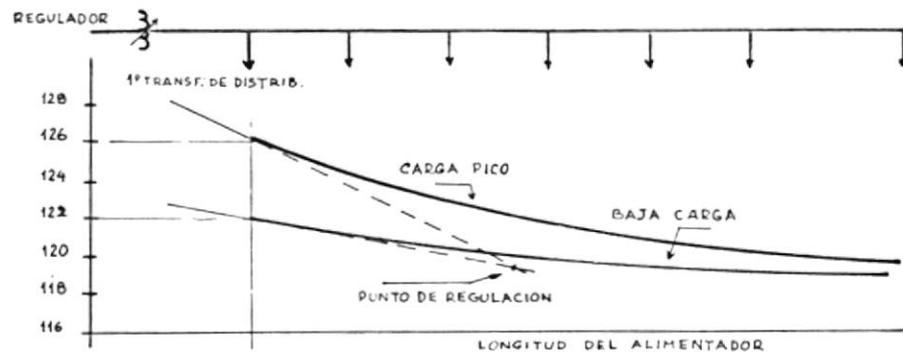


Fig. 13 Localización del regulador en un alimentador con carga distribuída.

Por ejemplo, durante la carga pico, las condiciones de voltaje primario en el primer transformador debería ser 126V y digamos 122 V durante la carga ligera. Conociendo el voltaje que debe ser mantenido al primer usuario, es entonces posible determinar un punto de regulación ficticio, donde el voltaje debe ser mantenido constante.

En la figura 13, los perfiles de voltaje en las 2 condiciones extremas de carga son determinados y dibujados con el voltaje del primer transformador igual al valor deseado para cada condición de carga (126 V a carga pico y 122 V a carga baja). Debido a que la porción del perfil de voltaje desde la localización del regulador al primer transformador es lineal, ésta porción para ambos perfiles puede extenderse hasta que se crucen. El punto de cruce será el punto de regulación ficticio.

Cuando se determina el punto de regulación por éste método es necesario chequear periódicamente la calibración de los reguladores a medida que la carga crece, ya que nuevos perfiles de voltaje establecerán nuevos puntos de regulación.

El control de los pasos que debe dar un regulador de voltaje recibe su señal de las condiciones del circuito a la cual está conectado. La señal principal usada por el control es

el voltaje, a diferencia de los capacitores conectables, los cuales utilizan muchos tipos de señales (Voltaje, corriente, tiempo, temperatura).

Los componentes del control para un regulador de voltaje a pasos son de gran importancia para el ingeniero de distribución, y son :

Ancho de banda.- El ancho de la banda al cual debe ser calibrado un regulador tiene un efecto directo sobre la cantidad de carga que puede transportar un alimentador con limitaciones de voltaje.

El voltaje de dispersión entre el primero y el último usuario es consumido en las caídas de voltaje del secundario, transformador de distribución, circuito primario, así como en el ancho de la banda del regulador.

La parte mas pequeña es usada en el ancho de la banda, el resto es utilizado en los otros componentes.

El voltaje tomado del ancho de banda puede ser sumado a la caída de voltaje permisible en el primario. Esto permite un incremento en la cantidad de carga que puede ser transportada en el alimentador existente. Como consecuencia de esto la longitud del alimentador puede ser incrementada en una área de densidad uniforme de carga, con el consiguiente au-

mento en carga.

Estos incrementos estarán de acuerdo con las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ incremento en carga} = \frac{BWD}{VD_1} \times 100 \quad (9)$$

$$\% \text{ incremento en longitud} = \left(\sqrt{1 + \frac{BWD}{VD_1}} - 1 \right) 100 \quad (10)$$

Donde: BWD = Reducción de voltios en el ancho de banda

VD_1 = Valor original de la caída de voltaje permisible antes de la reducción del ancho de banda

En general, los reguladores pequeños permiten una calibración de un ancho de banda más pequeño. En adición al incremento en longitud y carga del alimentador, un ancho de banda más pequeño permite mantener promedios de voltaje más altos, dentro de la zona permisible, en el punto de consumo.

Retardo de Tiempo.- El retardo de tiempo debe ser calibrado a fin de que exista un compromiso adecuado entre el número de operaciones de cambio de tap y el control de voltaje deseado. Si el retardo de tiempo es demasiado corto, el regulador operará excesivamente, respondiendo aún a transientes momentáneos. Es recomendable entonces, que el número de operaciones sea controlado por cambio en el retardo de tiempo y no variando el ancho de banda.

Cuando tenemos reguladores en cascada en un circuito, el regulador más cercano a la fuente debe tener un retardo de tiempo más corto, y se debe incrementar progresivamente, de tal manera que el retardo de tiempo más largo corresponda al regulador más lejano a la fuente.

Nivel de Voltaje.- Este es el voltaje alrededor del cual el regulador opera, y es la magnitud del voltaje a ser mantenido en el punto de control del voltaje.

El nivel de voltaje es calibrado en conjunto con el compensador de caída en la línea.

Compensador de Caída de Voltaje en la línea (LDC).- En la mayoría de los casos, será necesario usar un compensador de caída de voltaje en la línea funcionando con el regulador , para obtener en los terminales del regulador una variación del voltaje apropiada para los requerimientos del sistema. La siguiente información se requiere para determinar la calibración del LDC :

- a) Longitud del alimentador
- b) Calibre del conductor y el espaciamiento equivalente
- c) Relación de los transformadores de potencial del regulador
- d) Rango primario de los transformadores de corriente del regulador
- e) Tipo de conexión del circuito

El LDC tiene en su circuito de control una resistencia y una reactancia ajustables, las cuales hacen posible simular una impedancia real. Una combinación de estos ajustes nos provee un rango de calibración de ± 24 voltios.

La Fig. 14 nos muestra un diagrama del circuito de control y del LDC de un regulador.

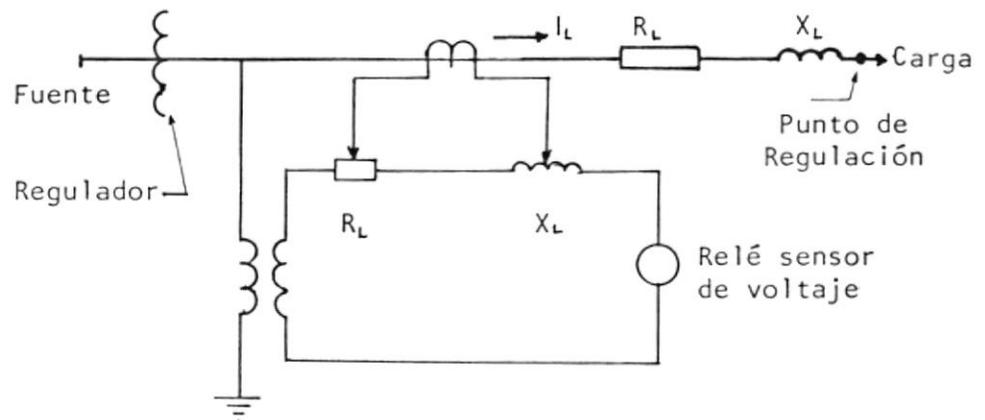


Fig. 14 Diagrama simplificado del circuito de control y LDC de un regulador

Un transformador de corriente de línea dentro del regulador causa una corriente proporcional a la corriente de carga, la cual fluye a través de R y X del circuito del compensador. La caída I_Z del compensador se resta del voltaje secundario del transformador de potencial, y la resultante es aplicada al relé sensor de voltaje. Este sensor hace que el regulador mantenga un voltaje suficientemente alto (o bajo)

que compense la caída (o elevación) de voltaje en un punto determinado de la línea, adelante del regulador, llamado usualmente el Punto de Regulación. Esto causará que el voltaje en ese punto permanezca esencialmente constante.

El sensor de voltaje es ajustado de tal manera que, con corriente de carga cero, la salida de voltaje del regulador sea igual al voltaje deseado en el punto de regulación.

2.2 COMPARACION DE LOS METODOS CONVENCIONALES PARA MEJORAR LA REGULACION DE VOLTAJE

De los diferentes métodos a que hemos hecho referencia en los números anteriores, para mejorar la regulación de voltaje, a más de los que requieren de una planificación (Cambio de sección del conductor, elevación del nivel de voltaje), podemos agrupar los diferentes tipos en tres clases :

a) Control de voltaje en la fuente :

- Control de la barra de voltaje en la estación generadora.

b) Control de la relación de voltaje :

- Transformadores con LTC
- _ Reguladores de inducción
- _ Regulador de voltaje a pasos

c) Control de Kilovars :

- Condensadores síncronos
- Capacitores desconectables

Los tipos y tamaños del equipo a escogerse dependen de la naturaleza de la carga y de las características del sistema.

Podría reconocerse que el método más barato y fácil de control de voltaje es variando el voltaje de barra en la estación generadora, variando el control de campo del generador.

Este método se emplea en nuestro sistema, razón por la cual no existen problemas de regulación en la primera extensión de los alimentadores.

El control de la relación de voltaje en la subestación (Transformadores con LTC), para nuestro caso específico no es aplicable debido a que se pueden presentar voltajes demasiado altos a los usuarios que se encuentran cercanos a la subestación, que como hemos dicho son numerosos.

Debido a que la pobre regulación se presenta por la longitud excesiva de los alimentadores, una buena solución es la instalación de reguladores de voltaje a pasos. Se descarta el uso de reguladores de inducción por resultar obsoletos.

A la fecha de analizar esta situación no hay problemas con la energía reactiva, debido a que los grupos generadores tienen sobrada capacidad de Kilovars para entregar al sistema. Por esta razón

se consideró que cuando se implante el nuevo diagrama unifilar y varíen las condiciones del sistema, sería el momento oportuno para aplicar la instalación de capacitores, ya que estamos de acuerdo en que una buena combinación de reguladores de voltaje y capacitores satisfacen en mayor grado los requerimientos de una empresa eléctrica.

En la Tabla II se presenta un cuadro comparativo del comportamiento de los reguladores de voltaje a pasos y de los capacitores que son los dos métodos para mejorar la regulación de voltaje en los cuales hemos centrado nuestra atención.

TABLA II FUNCIONES EJECUTADAS POR CAPACITORES Y REGULADORES DE VOLTAJE A PASOS

FUNCION	REGULADOR DE VOLTAJE	CAPACITORES DESCONECTABLES	COMENTARIOS
1.- Puede subir y bajar el voltaje de salida.	SI	SI*	* No es inherente con el capacitor conectado, pero dará esta efecto estando desconectado, al momento de conectarse.
2.- Capaz de controlar el voltaje a pasos pequeños.	SI	NO	
3.- Puede elevar el voltaje del sistema en el lado de la fuente.	NO	SI	
4.- Es capaz de mantener un ancho de banda de $\pm 3/4$ V.	SI	NO*	* Los capacitores desconectables no permiten usualmente este pequeño ancho de banda.
5.- Capaz de muchas operaciones sin inspección frecuente.	SI	NO*	* Los contactos del switch del capacitor se deterioran rápidamente con un gran número de operaciones por día.
6.- Reducen las pérdidas I R y I X del sistema.	NO*	SI	* No es inherente con el regulador, pero se obtiene alguna reducción como consecuencia del incremento de voltaje.
7.- Aumenta la capacidad de carga del sistema.	SI*	SI	* El regulador aumentará la capacidad de carga en el lado de salida, pero no en el lado de entrada del sistema.
8.- Reduce la carga térmica.	NO	SI	

CAPITULO III

ANALISIS DE LA SITUACION DEL SISTEMA BABAHOYO EN EL AÑO 1.981

3.1 DESCRIPCION DEL SISTEMA BABAHOYO, DIAGRAMA UNIFILAR

El diagrama unifilar de la Fig. 15 nos representa el sistema Babahoyo al año 1.981.

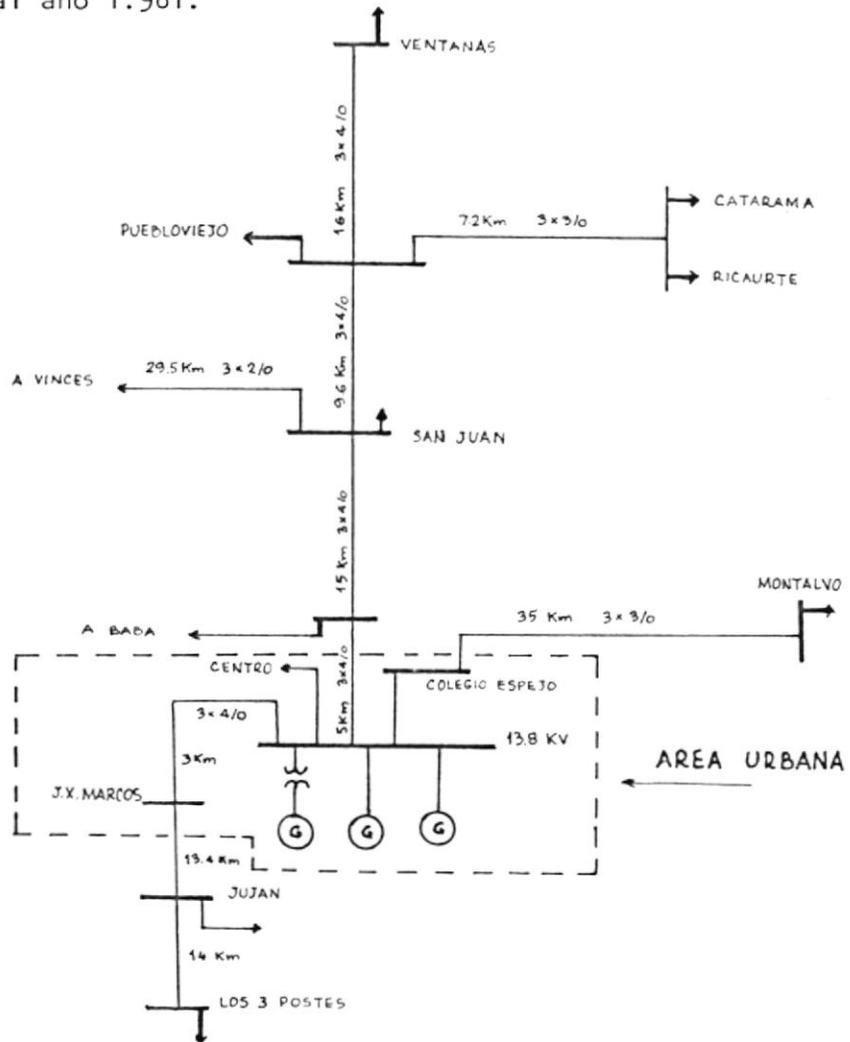


Fig. 15 Diagrama unifilar del Sistema Babahoyo al año 1.981

El punto de generación se encuentra en el centro de la carga, razón por la cual el voltaje de la barra de la subestación se controla mediante la variación de la corriente de campo del generador, en cualquier momento.

Esta particularidad hace que no sea práctico el uso de equipos de regulación en la subestación, debido a los voltajes elevados que podrían presentarse a los usuarios cercanos a la subestación.

Los alimentadores radiales que salen en distintas direcciones, al salir del casco urbano prácticamente se convierten en alimentadores rurales. Estos alimentadores, por su longitud y carga presentan un problema de regulación de voltaje, el cual es objeto de análisis en este trabajo.

En virtud de que las condiciones en cada uno de los alimentadores son similares, particularizaremos el análisis en el alimentador Babahoyo-San Juan-Puebloviejo-Ventanas, el cual a esa fecha era el de mayor importancia, por su carga y por el número de poblaciones servidas.

3.2 PERFIL DE VOLTAJE DE LA LÍNEA DE DISTRIBUCION BABAHOYO-SAN JUAN - PUEBLOVIEJO-VENTANAS

El perfil de voltaje para esta línea se obtuvo en base a los datos tomados de los secundarios de los diversos transformadores conectados a lo largo de la línea y que sirven para dar servicio a

los diferentes usuarios.

Las lecturas fueron tomadas de transformadores monofásicos de similares características (7.620/13.200 Y - 120/240), con tap en el punto 3, y en la hora de mayor demanda. Sus resultados se muestran en la tabla III

TABLA III
VALORES DE VOLTAJE SECUNDARIO TOMADOS A LO LARGO DE LA LINEA

USUARIO	UBICACION	VOLTAJE SEC.	VOLTAJE PRIM. (referido)
Pablo Nuques	Cruce de Baba (km. 5)	122	7.620
Mauro Arévalo	Km. 12	116	7.366
Félix Mora	San Juan (Km. 19,5)	113	7.175
Elena Moscol	Km. 22	111	7.048
Arturo Cedeño	Km. 26	110	6.985
Clemente Moreno	Km. 30	108	6.858
Angel García	Km. 45	103	6.540

La graficación de estos datos nos da el perfil de voltaje de la Fig. 16. Como podemos observar el voltaje primario cae por debajo del valor mínimo permisible para esa localización (Tabla I), casi en la mitad del alimentador.

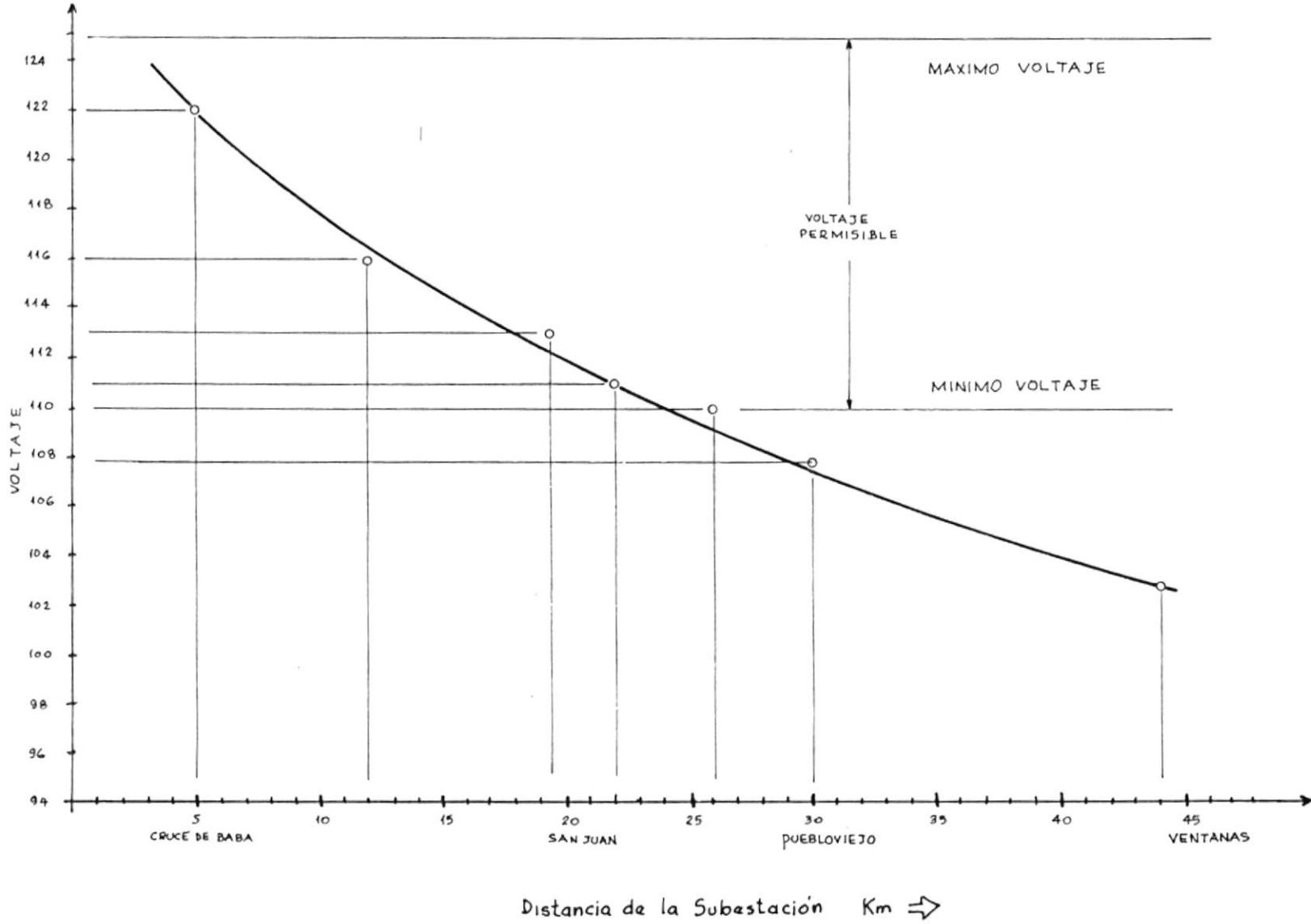


Fig. 16 Perfil de voltaje de la línea Babahoyo-San Juan-Pueblo Viejo-Ventanas

3.3 EL SISTEMA BABAHOYO A CORTO PLAZO

El diagrama unifilar de la Fig. 17 nos representa lo que sería el Sistema Babahoyo para el año 1.984.

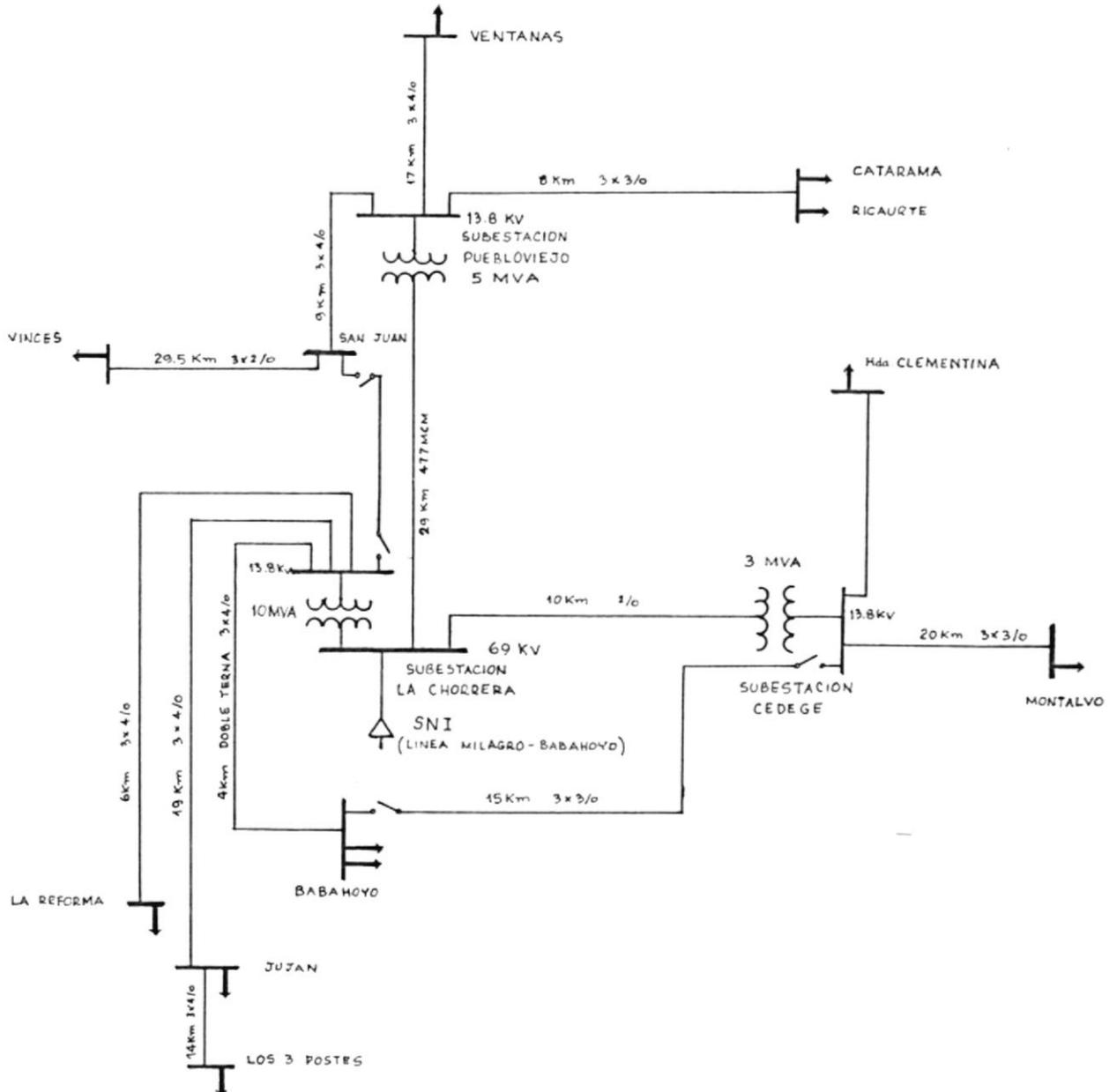


Fig. 17 Diagrama unifilar del Sistema Babahoyo para 1.984

Podemos ver que el desarrollo del sistema contempla varios métodos para mejorar la regulación de voltaje ; (incremento del nivel de voltaje de distribución a 69 KV, y disminución de la longitud de ciertos alimentadores, en especial del alimentador hacia Ventanas, con la consecuente disminución de carga.

3.4 EQUIPO DISPONIBLE PARA SUPERAR EL PROBLEMA

A esa fecha la Empresa Eléctrica Los Ríos, contaba en sus bodegas con un lote de reguladores de voltaje a pasos, tipo ML-32, de 72 KVA cada uno, monofásicos, los mismos que habían sido adquiridos en años anteriores.

En la sección 2.2 establecimos los pro y contras de varios de los métodos usados para mejorar la regulación de voltaje en líneas de distribución, centrandó nuestra atención a la utilización de capacitores y reguladores de voltaje.

Ya que ningún regulador de voltaje o capacitores pueden por sí solos cumplir con todas las funciones deseadas, el aspecto económico fué un factor decisivo para la elección del método a usar, habida cuenta de que la inversión ya estaba realizada.

CAPITULO IV

UTILIZACION DE AUTOTRANSFORMADORES PARA MEJORAR LA REGULACION DE VOLTAJE EN EL SISTEMA BABAHOYO

El regulador de voltaje a pasos General Eléctric, tipo ML-32 es esencialmente un autotransformador regulador monofásico. Un devanado serie con varios taps, un motor operador y un switch selector de tap ofrecerán regulación de voltaje desde el 10% sobre y 10% bajo el voltaje de línea, en 32 pasos de $5/8$ cada uno.

El regulador automáticamente es operado por un control estático, el cual responde a cambios de voltaje en el sistema para iniciar el cambio de tap deseado.

4.1 INSTALACION TIPICA PARA UN BANCO DE REGULADORES

El sistema de distribución Babahoyo es a 13.800 V , en Y con neutro aterrizado. La Fig. 18 nos muestra el diagrama de conexiones para un banco trifásico de reguladores.

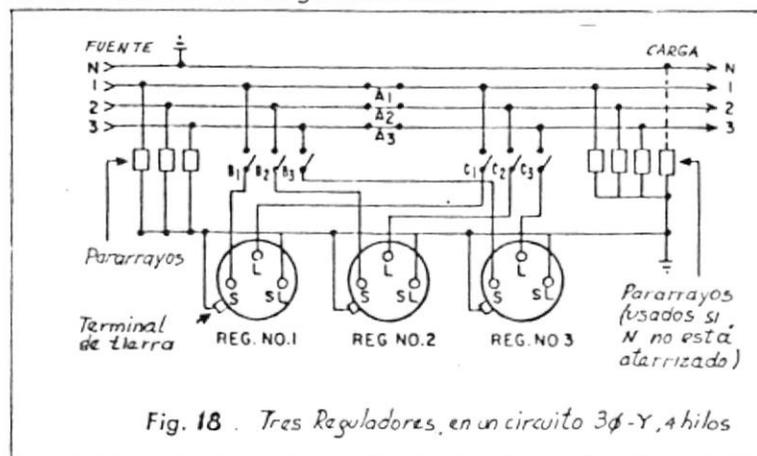


Fig. 18 . Tres Reguladores, en un circuito 3φ-Y, 4 hilos

El regulador General Electric ML-32 no puede ser operado en una conexión en Y con el neutro del banco aislado. Cuando estos reguladores son conectados en Y, el neutro del banco debe ser conectado efectivamente al neutro del sistema. Sin esta interconexión, la conexión Y es peligrosa, ya que el control individual e independiente de cada fase puede causar una desigual relación de vueltas entre fases, resultando un desplazamiento del neutro aislado, con extrema distorsión de los voltajes de fase.

La Fig. 19 nos muestra una instalación típica para el montaje de un banco de reguladores.

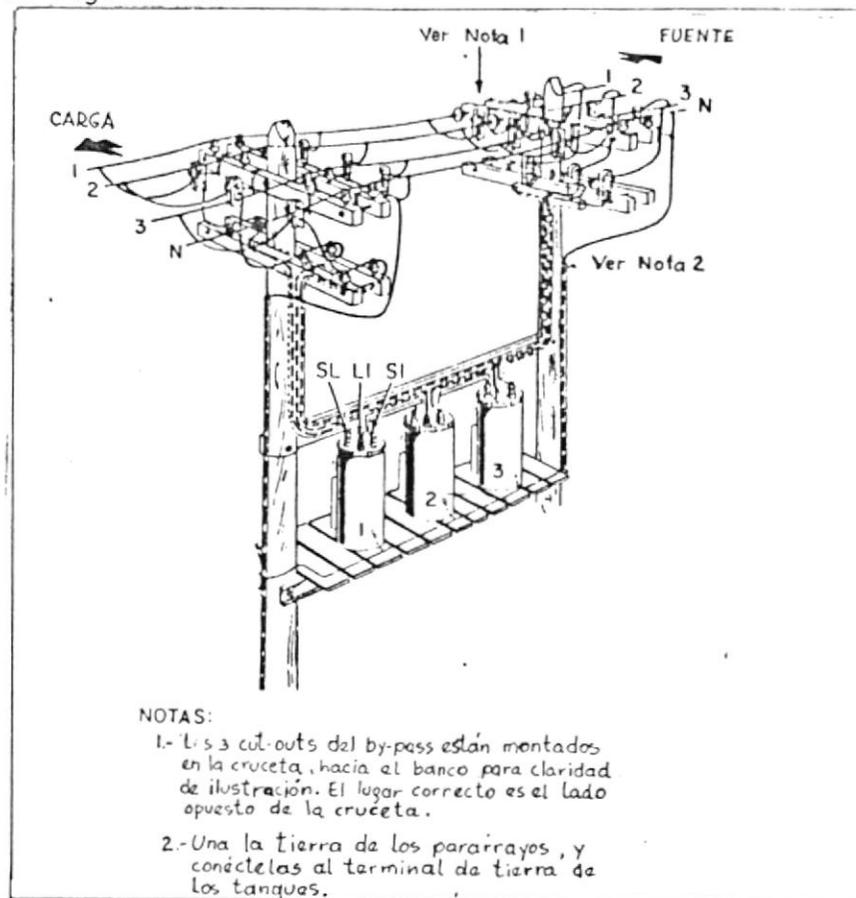
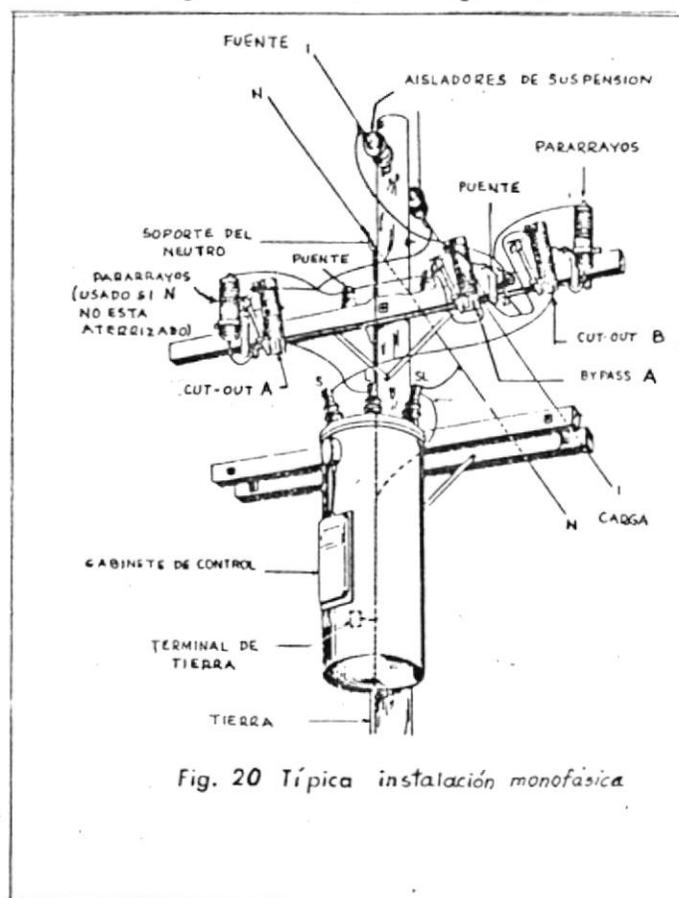


Fig. 19 Instalación típica de un banco de reguladores

4.2 MODO DE INSTALACION PROPUESTO

En virtud del alto costo de montar un banco de reguladores según - la Fig. 19 y considerando el cambio que se iba a operar al implan- tar el nuevo diagrama unifilar, se procedió a instalar el banco de reguladores en una conexión Y a tierra, pero con cada regulador en un poste diferente y separados aproximadamente 80m entre sí, cui- dando de que la interconexión del neutro sea lo más segura posible, y aterrizando sólidamente el neutro en cada uno de los puntos de- colocación de los reguladores (ver Fig. 20).



4.3 CALCULO DE LOS PARAMETROS DE LA LINEA Y DIMENSIONAMIENTO DEL BANCO

La línea de distribución a ser analizada tiene las siguientes características :

Voltaje de operación : 13.800 Voltios línea-línea

Calibre del conductor: # 4/0 AWG

Tipo de conductor : ACSR

La disposición de los conductores en la estructura es la mostrada en la Fig. 21.

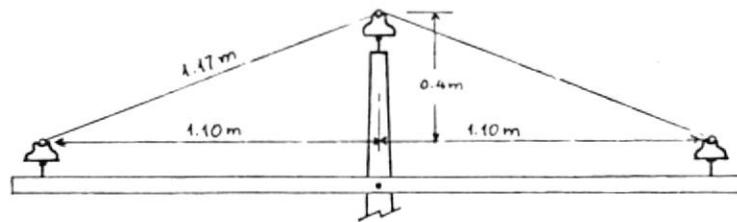


Fig. 21 Espaciamento de los conductores en la línea

Del análisis de las tablas que nos dan las características eléctricas de los diferentes tipos de conductores, podemos obtener los valores de la resistencia por unidad de longitud y de la reactancia inductiva a 1 pie de espaciamento y al espaciamento equivalente.

La reactancia inductiva por unidad de longitud puede también obtenerse de la fórmula :

$$X = 2\pi fL = 2\pi f \cdot 0.7411 \cdot 10^{-3} \log \frac{D_m}{D_s}$$

$$R = 0.445 \Omega/\text{milla} = 0.276 \Omega/\text{Km (de las tablas)}$$

4.3 CALCULO DE LOS PARAMETROS DE LA LINEA Y DIMENSIONAMIENTO DEL BANCO

La línea de distribución a ser analizada tiene las siguientes características :

Voltaje de operación : 13.800 Voltios línea-línea

Calibre del conductor: # 4/0 AWG

Tipo de conductor : ACSR

La disposición de los conductores en la estructura es la mostrada en la Fig. 21.

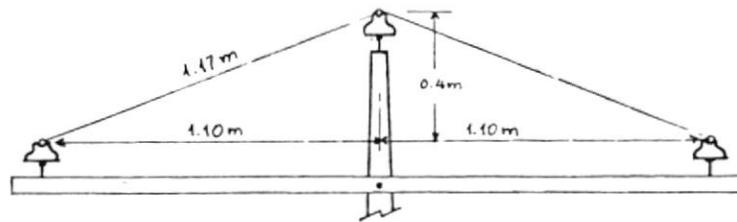


Fig. 21 Espaciamento de los conductores en la línea

Del análisis de las tablas que nos dan las características eléctricas de los diferentes tipos de conductores, podemos obtener los valores de la resistencia por unidad de longitud y de la reactancia inductiva a 1 pie de espaciamento y al espaciamento equivalente.

La reactancia inductiva por unidad de longitud puede también obtenerse de la fórmula :

$$X = 2\pi fL = 2\pi f \cdot 0.7411 \cdot 10^{-3} \log \frac{D_m}{D_s}$$

$$R = 0.445 \Omega/\text{milla} = 0.276 \Omega/\text{Km (de las tablas)}$$

$$\text{Donde : } D_m = \sqrt[3]{2.2 \times 1.17 \times 1.17} = 1.44 \text{ m} = 4.73 \text{ pies}$$

$$D_s = 0.00814 \text{ pies (dato obtenido de las tablas)}$$

Entonces:

$$X = 2\pi f \cdot 0.7411 \cdot 10^{-3} \log \frac{4.73}{0.00814}$$

$$X = 0.772 \text{ } \Omega/\text{milla} = 0.48 \text{ } \Omega/\text{Km}$$

DIMENSIONAMIENTO DEL BANCO.- Los KVA de placa de un regulador de voltaje, son solamente los KVA que son transformados dentro del regulador y no los KVA de carga de la línea.

La cantidad de KVA de regulación requeridos para un banco de reguladores conectados en Y, están dados por la Ecuac.12.

$$\text{KVA de regulación} = (X\% \text{ de regulación de la línea}) \cdot \text{KVA}_{3\phi} / 100 \quad (12)$$

Para nuestra línea en cuestión tenemos :

$$\text{KVA}_{3\phi} = 2.000 \text{ KVA}$$

$$X\% = 10$$

$$\text{KVA de regulación} = 10 \times 2.000 / 100 = 200 \text{ KVA}$$

En consecuencia con un banco de 3 reguladores de 72 KVA cada uno obtendremos nuestro cometido.

4.4 CALIBRACION DE LOS PARAMETROS DEL REGULADOR

4.4.1 UBICACION DEL PUNTO DE INSTALACION DE LOS REGULADORES

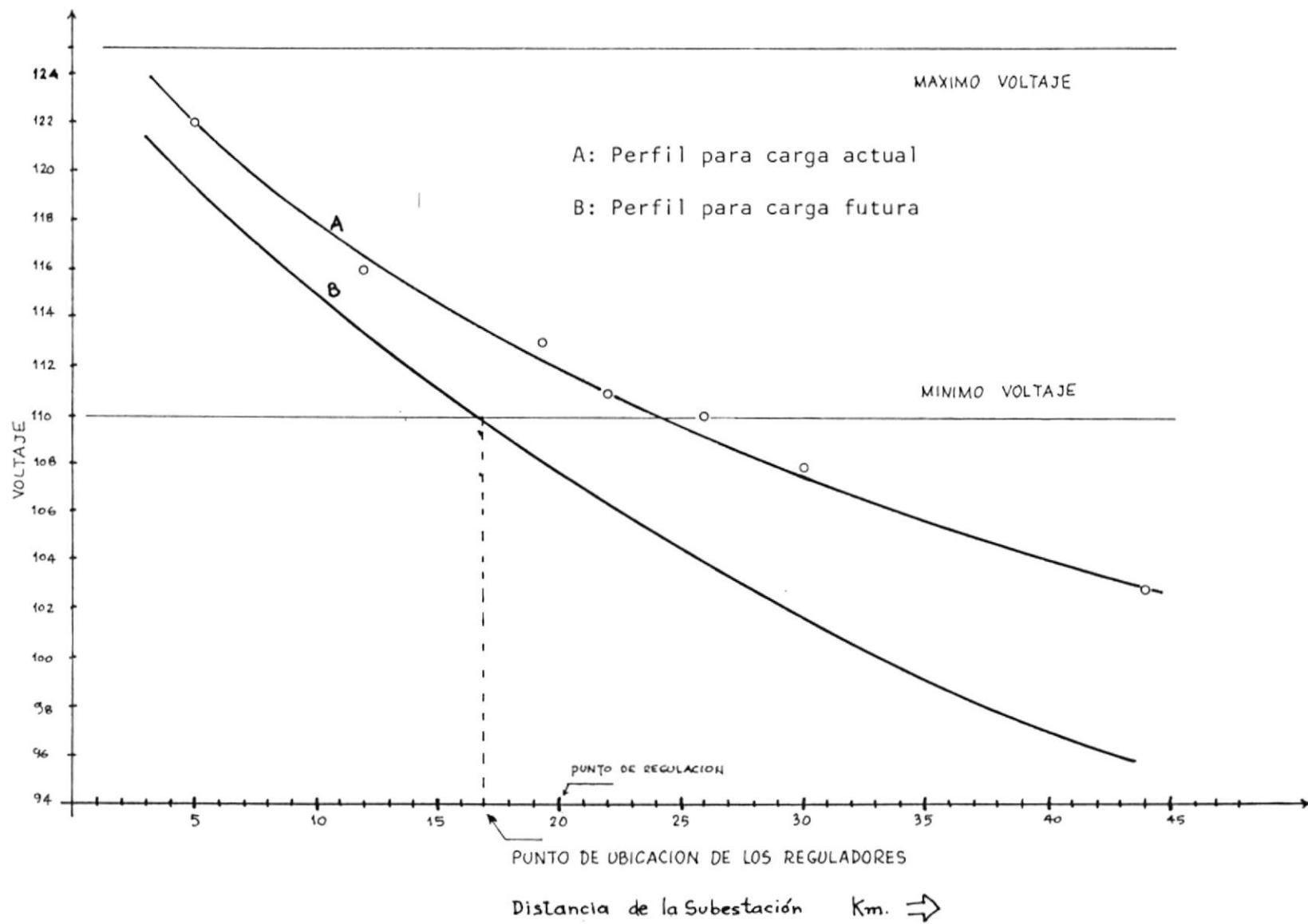


Fig. 22 Localización del banco de reguladores

Para ubicar el punto de instalación de los reguladores se graficó una curva aproximada (curva B Fig. 22), considerando un aumento de carga de un 15% para un futuro cercano.

4.4.2 NIVEL DE VOLTAJE

Todos los controles de calibración de los parámetros del regulador se encuentran incorporados a un control estático ubicado dentro de un gabinete metálico (ver Fig. 23).

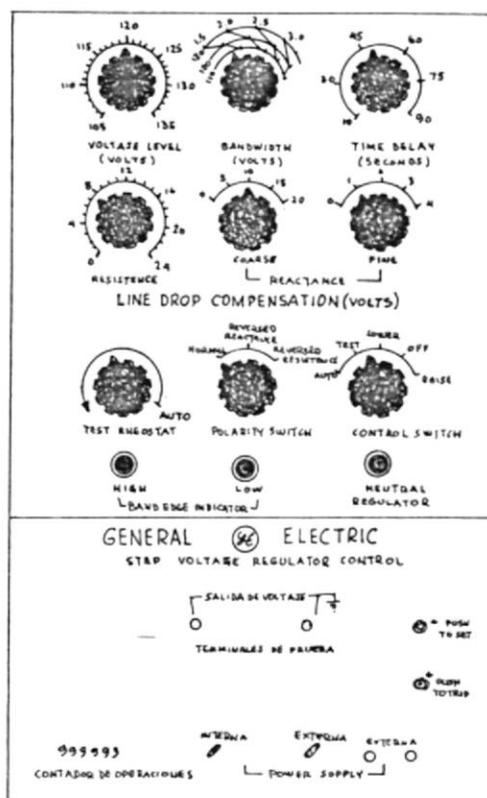


Fig. 23 Panel de control, vista de frente

El aparato sensor de voltaje mide continuamente el voltaje de salida del regulador y controla la operación del motor para causar los cambios de tap, manteniendo la salida de voltaje dentro de una banda prefijada.

El ajuste del control del nivel de voltaje se lo calibró a 120 V, que es el valor promedio permisible.

4.4.3 ANCHO DE BANDA

El ajuste del ancho de banda se obtiene en el control mediante la intersección de la línea del nivel de voltaje, con la línea del ancho de banda (Fig. 23). Para un ajuste de 120 Voltios, se calibró un ancho de banda de 2.0 Voltios.

4.4.4 RETARDO DE TIEMPO

El retardo de tiempo es calibrado a 30 Segundos en la fábrica, y se lo recomienda a menos que alguna aplicación particular indique otra cosa.

4.4.5 COMPENSADOR DE CAIDA EN LA LINEA (LDC)

En vista de que el ramal que sale de la barra de San Juan hacia Vinces es una alimentación alterna para esa población se estableció como punto de regulación San Juan. De la Fig. 22 se observa que el sitio de instalación de los reguladores se traslada hacia atrás en la curva de carga futura, que

dando a 3 Km aproximados del punto de regulación.

Los ajustes para el LDC pueden ser obtenidos de las siguientes ecuaciones :

$$R = \frac{ICT \times \text{Resistencia de la línea (ohms)}}{\text{Relación del transf. de potencial}}$$

$$X = \frac{ICT \times \text{Reactancia de la línea (ohms)}}{\text{Relación del transf. de potencial}}$$

Donde : ICT = Régimen de corriente primaria del transf. de corriente

De los datos del fabricante, mostrados en la Tabla IV, se obtienen los valores de la relación de transformación para los transformadores de potencial para los distintos valores de voltaje de operación.

TABLA IV
RELACIONES DE POTENCIAL ESTANDARES

Voltaje de régimen	Voltaje de operación	Relación de Potencial	Nivel de voltaje del sensor
7.620	7.960	66.7:1	119.3
	7.620	66.7:1	114.2
	7.620	63.5:1	120
	7.200	60:1	120

Para nuestro caso particular, la relación de potencial es 60, y de los datos de placa del regulador se tiene que ICT=100.

Entonces:

$$R = \frac{100 \times 0.276 \Omega/\text{Km} \times 3\text{Km}}{60} = 1.38$$

$$X = \frac{100 \times 0.48 \Omega/\text{Km} \times 3\text{Km}}{60} = 2.4$$

4.4.6 PERFIL DE VOLTAJE OBTENIDO CON LA INSTALACION DEL BANCO DE REGULADORES

El perfil de voltaje, resultado del montaje del banco de reguladores, se muestra en la Fig. 24, en la que observamos como se ha logrado mejorar las condiciones del voltaje en la línea primaria, llegando incluso a estar dentro de los valores permisibles aún dentro de la población de Ventanas.

Ahora bién, en esta población existía un 70% de la red secundaria alimentada con transformadores trifásicos de relación 13.800-120/208 Voltios, lo cual disminuía el valor de los voltajes a nivel de usuario por debajo del mínimo permisible.

Ante esta situación se decidió montar otro banco de reguladores, el mismo que se lo situó a 1.5 Km. de la entrada de la población. Para evitar voltajes excesivos en los sectores alimentados con transformadores monofásicos, se redujo la posición del tap en los mismos.

El procedimiento de montaje y calibración se lo realizó de manera similar. Los ajustes para el segundo banco de reguladores quedaron así :

Nivel de voltaje	:	120 V
Ancho de Banda	:	2 V

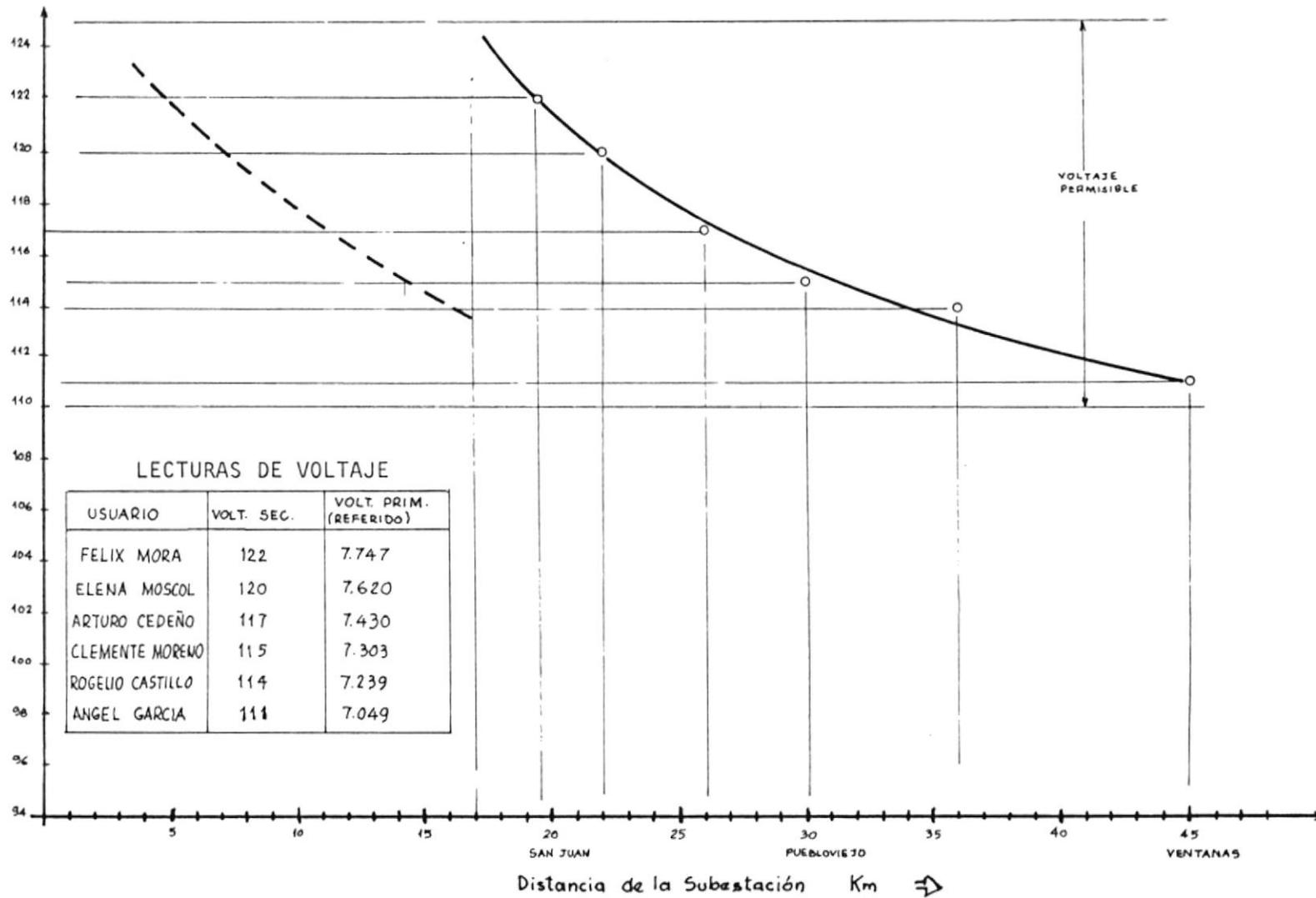


Fig. 24 Perfil de voltaje con el banco de reguladores instalado

Retardo de tiempo ; 60 Seg

Los nuevos valores de X y R, del Compensador de caída en la línea, considerando nuestro punto de regulación la población de Ventanas, fueron :

$$R = \frac{100 \times 0.276}{60} / \text{Kmx}1.5 = 0.69$$

$$X = \frac{100 \times 0.48}{60} / \text{Kmx}1.5 = 1.2$$

Después de esta instalación, los valores en la red secundaria tuvieron los siguientes valores promedio :

Red Secundaria trifásica : 115/200 V

Red secundaria monofásica : 118/236 V

4.5 PROCEDIMIENTO GENERAL PARA EL MONTAJE DEL EQUIPO

- a) Antes de proceder a la instalación del banco de reguladores es necesario realizar un chequeo del control estático en cada uno de ellos. Esto se lo hace excitando cada regulador desde una fuente exterior de suficiente capacidad, que bien podría ser un transformador de 5 KVA.
- b) Los reguladores pueden conectarse con línea energizada siempre y cuando su instalación incluya los switchs y desconectores indicados en la Fig. 18 .
- c) Hay que aterrizar efectivamente el tanque de cada regulador, to

mando la precaución de utilizar un conductor de calibre adecuado, el mismo que soporte las corrientes en caso de una falla a tierra.

- d) Para evitar que se dañen los devanados de un regulador, el By-pass A nunca debe ser cerrado con la corriente de carga fluyendo por el mismo, a menos que el control estático haya sido previamente llevado a la posición neutra.
- e) Para proceder a conectar un regulador a la línea hay que seguir la siguiente secuencia, en base a la Fig. 18 :
- El switch A, en serie con la línea debe estar cerrado.
 - Los Switchs B(fuente) y C(carga) deben estar abiertos.
 - Cerramos primero el switch B
 - En el control se cierra el interruptor de alimentación para excitación interna del regulador.
 - Se inicia el trabajo del control del regulador y se lo lleva a la posición neutra. Una luz indicará el momento en que se logre esto.
 - Se desconecta el interruptor de alimentación para excitación interna.
 - Se cierra el switch C del lado de la carga.
 - Abrimos el By-pass A.
 - Se chequean visualmente todos los parámetros.
 - Se cierra nuevamente el interruptor de alimentación y se lo ubica en la posición AUTOMATICO.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En un sistema con alimentadores rurales de rápido crecimiento, la instalación de Reguladores de Voltaje a pasos es una gran herramienta con que cuenta el ingeniero de distribución, para resolver problemas relacionados con la regulación de voltaje.

La versatilidad del control estático y su amplio rango de ajustes hace posible que puedan ser recalibrados para que continúen efectuando su tarea, sin necesidad de reubicarlos, aunque varíen las condiciones de carga del sistema. Se puede mantener un regulador hasta un máximo de sobrecarga de 160%, a costa de reducir el margen de regulación a la mitad, es decir al 5%.

La labor de chequeo e inspección no necesita de su desconexión del sistema, ya que estos trabajos, al igual que los de recalibración, pueden realizarse llevando al regulador a su posición neutra por medio del control estático, permitiendo mantener un registro regular de sus operaciones y de los porcentajes de regulación máximos y mínimos realizados.

Siempre y cuando en un sistema en Y aterrizado, la conexión a tierra de los reguladores sea bastante confiable, es recomendable conectarlos separadamente debido al gran ahorro en que redundará una instalación de este tipo, al no necesitarse estructuras especiales para el montaje del banco.

Si falla la conexión a tierra pueden presentarse voltajes desbalanceados

en el sistema trifásico.

De igual manera el costo de instalación por energía no vendida durante el tiempo del montaje, será muy inferior instalándolos separadamente, ya que al trabajar en tres estructuras simultáneamente es posible realizar el trabajo en poco tiempo.

Otro aspecto fundamental de este modo de instalación es la facilidad para llevar a cabo su remoción, cuando se los quiere instalar en otro punto del sistema. Este es el caso en el sistema estudiado anteriormente, en el cual los reguladores fueron removidos una vez que se recibió energía del SNI, para proceder a instalarlos en la subestación Babahoyo, ya que el flujo de potencia cambió de sentido.

En lo que respecta a la capacidad de energía reactiva del sistema, si el mismo no presenta restricciones para el suministro de Kilovars, es indudable que el uso de reguladores de voltaje a pasos es el método más efectivo para mejorar la regulación de voltaje en una línea de distribución rural.

VOLTAJE DEL SISTEMA	5KV										15 KV									
	10"					60"					10"					60"				
	0.7	0.8	0.9	0.95	1.0	0.7	0.8	0.9	0.95	1.0	0.7	0.8	0.9	0.95	1.0	0.7	0.8	0.9	0.95	1.0
COBRE																				
#6 Sólido	38.9	42.6	45.6	46.6	45.0	42.1	45.3	47.5	47.9	44.6	39.6	43.0	45.7	46.4	45.2	42.4	45.5	47.4	47.9	45.1
#4 Sólido	27.6	29.3	30.4	30.5	28.2	30.6	34.9	32.3	34.7	30.4	27.7	29.4	30.5	30.5	29.4	30.7	34.9	32.3	34.6	28.3
#2-3 Str.	20.0	20.7	20.8	20.4	17.5	23.0	23.2	22.6	24.0	17.7	20.1	20.7	20.6	20.4	18.0	23.0	23.2	22.6	24.7	17.9
#1/0 - 75Str.	15.1	15.1	14.6	14.0	14.3	18.1	17.4	16.4	15.1	14.2	15.1	15.4	14.7	14.0	14.4	18.1	17.4	16.4	15.2	14.4
#2/0 - 75Str.	13.3	13.1	12.4	11.6	8.96	16.2	15.5	14.1	12.8	8.80	13.3	13.1	12.4	11.6	9.05	14.2	13.5	12.4	11.9	9.98
#4/0 MCM - 125Str.	10.5	10.8	9.08	8.32	5.60	12.4	12.4	10.6	9.39	5.85	10.5	10.5	9.14	8.26	4.34	11.5	10.9	9.80	9.50	5.62
250 MCM - 125Str.	9.00	9.00	8.12	7.26	4.74	12.5	14.9	9.82	8.44	4.60	9.61	9.10	8.15	7.31	4.82	11.5	10.9	9.80	9.54	4.75
300 MCM - 195Str.	8.89	8.32	7.31	6.44	3.96	14.8	10.7	9.01	7.43	3.81	8.90	8.31	7.34	6.49	4.02	14.9	10.8	9.09	7.72	3.96
500 MCM - 195Str.	7.42	6.74	5.65	4.77	2.36	10.3	9.14	7.35	5.94	2.33	7.44	6.76	5.65	4.81	2.42	10.4	9.20	7.44	6.05	2.37
ALUMINIO																				
#4 - 75Str.	39.5	43.4	44.7	47.8	44.3	42.7	46.1	48.6	49.1	46.1	40.2	43.8	46.0	47.8	46.5	43.3	46.4	48.6	49.1	46.4
#2 - 75Str.	27.7	29.6	30.9	31.1	28.2	30.7	32.2	32.8	32.4	29.0	27.9	29.7	31.0	31.1	29.3	30.9	32.2	32.8	32.4	29.2
#1/0 - 75Str.	19.9	20.6	20.9	20.6	18.3	21.9	23.1	22.6	24.8	18.4	19.9	20.7	20.5	20.6	18.4	22.9	23.1	22.7	21.8	18.3
#2/0 - 75Str.	17.1	17.5	17.3	16.9	14.5	20.1	19.9	19.1	18.1	14.3	17.1	17.5	17.4	16.9	14.5	20.1	19.9	19.1	18.1	14.5
#4/0 - 75Str.	12.9	12.8	12.2	11.5	9.87	15.9	15.3	13.9	12.7	9.91	12.9	12.8	12.2	11.6	9.15	15.9	15.3	14.0	12.8	9.88
336.4 MCM - 195Str.	10.1	9.71	8.88	8.10	5.70	13.0	12.1	10.6	9.38	5.56	10.1	9.72	8.90	8.14	5.76	13.0	12.2	10.7	9.38	5.70
397.5 MCM - 195Str.	9.33	8.86	7.97	7.18	4.79	12.2	11.3	9.68	8.34	4.64	9.34	8.88	8.00	7.27	4.86	12.3	11.3	9.76	8.46	4.80
477 MCM - 195Str.	8.41	8.08	7.14	6.34	3.98	14.5	10.5	8.65	7.51	3.85	8.41	8.10	7.17	6.37	4.05	11.5	10.5	8.93	7.61	3.99
795 MCM - 315Str.	7.03	6.41	5.42	4.61	2.39	9.92	8.82	7.42	5.79	2.26	7.04	6.43	5.45	4.65	2.44	9.94	8.87	7.21	5.89	2.39
ACSR																				
#4 - 6/4 Str.	41.4	45.5	48.9	50.0	48.4	44.6	48.1	50.8	51.3	48.2	42.2	45.9	49.0	50.0	48.6	45.2	48.4	50.8	51.3	48.5
#2 - 6/4 Str.	30.7	32.7	34.1	34.2	31.7	33.8	35.3	35.9	35.4	31.5	30.9	32.4	34.1	34.2	31.9	33.9	35.3	35.9	35.5	31.8
#1/0 - 6/4 Str.	23.3	24.2	24.3	23.9	21.0	24.3	26.6	26.1	25.0	20.8	23.4	24.2	24.3	23.9	21.1	24.3	26.6	26.1	25.1	21.0
#2/0 - 6/4 Str.	20.2	20.6	20.4	19.7	16.7	23.2	23.1	22.1	20.9	16.5	20.2	20.6	20.4	19.7	16.8	23.2	23.1	22.1	21.0	16.8
#4/0 - 6/4 Str.	15.4	15.3	14.7	13.9	11.0	18.3	17.7	16.9	15.1	10.8	15.4	15.3	14.7	13.9	11.1	18.3	17.8	16.4	15.2	11.1
336.4 MCM - 2675Str.	9.86	9.49	8.72	7.98	5.69	12.8	11.9	10.4	9.17	5.55	9.86	9.50	8.74	8.02	5.75	12.8	11.9	10.5	9.26	5.69
397.5 MCM - 2675Str.	9.09	8.67	7.87	7.08	4.80	12.0	11.1	9.64	8.26	4.67	9.10	8.68	7.86	7.11	4.86	12.0	11.1	9.62	8.36	4.81
477 MCM - 2675Str.	8.37	7.88	7.00	6.24	3.99	11.3	10.3	8.71	7.42	3.86	8.38	7.99	7.03	6.27	4.05	11.3	10.3	8.79	7.52	3.99
795 MCM - 2675Str.	6.79	6.20	5.26	4.49	2.36	9.68	8.61	7.17	5.67	2.23	6.80	6.22	5.29	4.52	2.40	9.72	8.67	7.04	5.76	2.35

ANEXO I TABLAS PARA ESTIMAR LAS CAIDAS DE VOLTAJE

BIBLIOGRAFIA

1. WILLIAM D. STEVENSON, Jr. Elements of power System análisis, pp.97.
2. ENCICLOPEDIA CEAC DE ELECTRICIDAD. Luminotecnia, pp.176-178 pp.245.
3. WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION. Transmission and Distribution, Reference Book. pp. 40-44 pp.50.
4. FITZGERALD - KINGSLEY - KUSKO . Electric Machinery. pp.350.
5. WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION. Distribution Systems, reference book. pp.247 - 292.
6. GENERAL ELECTRIC. Distribution Data Book. pp.22 - 30.
7. GENERAL ELECTRIC. Manual de instrucciones para Reguladores de voltaje tipo ML 32, monofásicos. pp. 8-13.