

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE MÉTODOS DE  
REGULACIÓN DE VOLTAJE EN LÍNEAS DE  
DISTRIBUCIÓN RURAL**

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**SARVELIO ORLANDO DE LEÓN GÓMEZ**

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, MARZO DE 1,999

**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

**ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE MÉTODOS DE  
REGULACIÓN DE VOLTAJE EN LÍNEAS  
DE DISTRIBUCIÓN RURAL**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 12 de febrero de 1998.



---

Sarvelio Orlando de León Gómez

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA**

DECANO: Ing. Herbert René Miranda Barrios  
VOCAL 1º: Ing. José Francisco Gómez  
VOCAL 2º: Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez  
VOCAL 3º: Ing. Jorge Benjamin Gutiérrez Quintana  
VOCAL 4º: Br. Dimas Alfredo Carranza Barrera  
VOCAL 5º: Br. José Enrique López Barrios  
SECRETARIA: Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN  
GENERAL PRIVADO**

DECANO: Ing. Herbert René Miranda Barrios  
EXAMINADOR: Ing. Julio Roberto Urdiales Contreras  
EXAMINADOR: Ing. Ángel Jesús García Martínez  
EXAMINADOR: Ing. David Córdón Cornel  
SECRETARIA: Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

Guatemala, 8 de octubre de 1998.

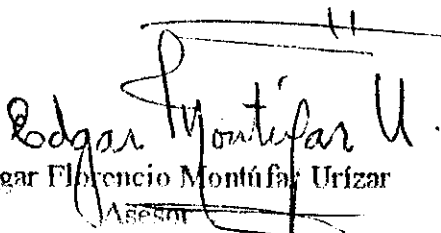
Señor Coordinador del Area de Potencia  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala.

Señor Coordinador:

Por este medio informo a usted que se ha terminado la elaboración del trabajo de tesis titulado: "Análisis Técnico Económico de Métodos de Regulación de Voltaje en Líneas de Distribución Rural" asignado al estudiante Sarvelio Orlando De León Gómez, carné 92 12873, a quien tuve la oportunidad de asesorar en el desarrollo del mismo.

Asimismo, manifiesto a usted que el autor de esta tesis y yo como asesor somos responsables del contenido de este trabajo.

Atentamente,

  
Ing. Edgar Florencio Montúfar Urizar  
Asesor  
Colegiado 1907.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 5 de noviembre de 1,998

Señor Director  
Ing. Roberto Urdiales Contreras  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.


Señor Director.

Me permito dar aprobación al trabajo de tesis titulado: **Análisis Técnico Económico de Métodos de Regulación de Voltaje en Líneas de Distribución Rural**, desarrollado por el señor **Sarvelio Orlando de León Gómez**, por considerar que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. Angel J. García Martínez  
Coordinador Área Potencia

AJCM/sdem.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de tesis del estudiante Sarvelio Orlando De León Gómez, titulada: Análisis Técnico Económico de Métodos de Regulación de Voltaje en Líneas de Distribución Rural, procede a la autorización del mismo.

Ing. Roberto Urdiales Contreras

Director

Guatemala 25 de noviembre de 1,998.

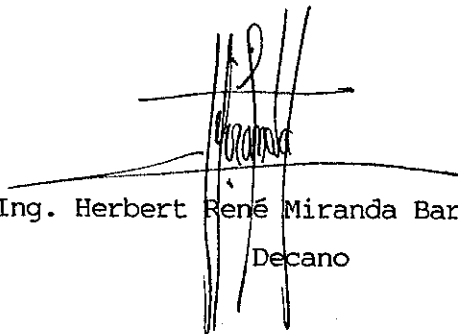




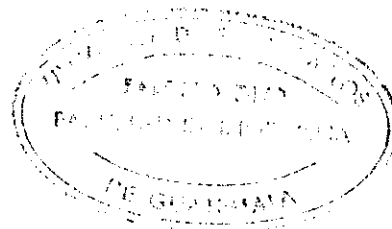
FACULTAD DE INGENIERIA

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de tesis: **Análisis Técnico Económico de Métodos de Regulación de Voltaje en Líneas de Distribución Rural**, del estudiante Sarvelio Orlando De León Gómez, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRIMASE:

  
Ing. Herbert René Miranda Barrios  
Decano

Guatemala, 2 de marzo de 1,999.



## **DEDICATORIA**

**A DIOS TODO PODEROSO:** Ser supremo fuente de sabiduría, que iluminó mi camino y hoy me permite culminar uno de mis objetivos profesionales.

**A:** San Marcos

**A MIS PADRES:** Adolfo de León y Sofía Gómez  
Con admiración y respeto, por enseñarme a actuar con equidad y no claudicar en la vida. Que el éxito de mi triunfo sea una pequeña retribución a su apoyo y esfuerzo.

**A MIS HERMANOS:** Lizandro, Julia y Luis  
Con cariño fraternal, por su colaboración y apoyo.



## AGRADECIMIENTO

- A: Ing. Edgar Montúfar, Ing. Carlos Rodas e Ing. Marco Comparini, por su apoyo, buena voluntad y valiosa colaboración.
- A: Todo el personal del departamento Ingeniería y Desarrollo de Empresa Eléctrica de Guatemala S. A., por la confianza y ayuda que me brindaron.
- A: Todas las personas que de una u otra forma colaboraron para realizar este trabajo de tesis.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS .....	vi
GLOSARIO .....	vii
INTRODUCCIÓN .....	ix
1. REGULACIÓN DE VOLTAJE EN LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN RURAL ...	1
1.1 Características generales de las líneas de distribución rural .....	1
1.1.1 Topología del circuito .....	1
1.1.2 Conductores .....	2
1.1.3 Tipo de carga .....	2
1.2 Caídas de tensión permisibles .....	3
1.3 Importancia de la regulación de voltaje .....	4
1.3.1 Cargas resistivas y motores .....	4
1.3.2 Cargas electrónicas e iluminación .....	5
1.4 Ventajas de regular el voltaje .....	6
1.5 Causas de la disminución de voltaje .....	6
1.6 Definiciones básicas .....	7
2. MÉTODOS PARA MEJORAR LA REGULACIÓN DE VOLTAJE .....	10
2.1 Capacitores .....	11
2.1.1 Propiedades eléctricas fundamentales de los capacitores .....	12
2.1.2 Construcción de los capacitores .....	12
2.1.3 Control para capacitores .....	13
2.1.4 Aplicación de capacitores en derivación afuera de la subestación ...	14
2.1.5 Aplicación de capacitores en derivación en la subestación .....	18
2.1.6 Factores de aplicación en la instalación de capacitores en derivación	19
2.2 Reguladores de voltaje .....	20

2.2.1	Descripción breve de un regulador de pasos .....	21
2.2.2	Control para el regulador de voltaje .....	21
2.2.3	Compensador de caída de línea .....	22
2.2.3.1	Ajuste del LDC .....	23
2.2.4	Capacidad de un regulador de voltaje .....	25
2.2.4.1	Aumento de la capacidad del regulador .....	25
2.2.5	Aplicación del regulador de voltaje afuera de la subestación .....	26
2.2.5.1	Coordinación de reguladores .....	26
2.2.6	Aplicación del regulador de voltaje tipo subestación .....	28
2.3	Cambiador de derivación bajo carga .....	29
2.4	Balance de carga en líneas trifásicas .....	30
2.5	Transferencia de cargas a nuevas líneas .....	31
2.6	Incremento de la sección del conductor .....	31
2.7	Cambio de líneas de monofásico a trifásico .....	32
2.8	Elevación del nivel de voltaje primario .....	33
3.	<b>METODOLOGÍA DE ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE MÉTODOS</b>	
	<b>DE REGULACIÓN DE VOLTAJE .....</b>	<b>35</b>
3.1	Datos característicos del circuito .....	35
3.1.1	Datos geográficos .....	35
3.1.2	Datos de carga .....	36
3.1.2.1	Demanda del circuito .....	36
3.1.2.2	Curva de carga .....	36
3.1.2.3	Factor de carga .....	37
3.1.2.4	Factor de pérdidas .....	37
3.1.2.5	Crecimiento de carga .....	38
3.1.3	Datos de las líneas .....	39
3.2	Estudio de flujo de carga .....	39
3.3	Criterios de evaluación para selección de métodos de regulación .....	40
3.4	Indicadores de evaluación .....	41

3.4.1	Tiempo de vida de la opción .....	41
3.4.2	Evaluación de los beneficios .....	42
3.4.3	Evaluación del costo de inversión .....	44
3.5	Análisis técnico .....	45
3.6	Análisis económico .....	46
3.7	Selección de la mejor opción .....	47
4.	APLICACIÓN .....	48
4.1	Características del circuito .....	48
4.1.1	Datos geográficos .....	48
4.1.2	Datos de carga .....	49
4.1.3	Datos de las líneas .....	51
4.2	Condiciones iniciales del circuito .....	51
4.3	Selección de métodos de regulación de voltaje .....	53
4.4	Análisis técnico económico de los métodos de regulación seleccionados ..	56
4.4.1	Análisis con el regulador tipo subestación .....	57
4.4.2	Análisis con el regulador de voltaje de línea .....	60
4.4.3	Análisis con cambio de conductores .....	64
4.4.4	Análisis con capacitores en la subestación de distribución .....	66
4.4.5	Análisis con capacitores en derivación afuera de la subestación ...	68
4.5	Análisis comparativo entre métodos de regulación .....	72
	CONCLUSIONES .....	74
	RECOMENDACIONES .....	75
	BIBLIOGRAFÍA .....	76
	ANEXO .....	77

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES








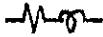
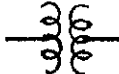
### FIGURAS

No.	Título	Pág.
1	Diagrama unifilar simplificado de un circuito de distribución de energía que alimenta áreas urbanas y rurales .....	2
2	Propiedades eléctricas del capacitor ideal .....	12
3	Efecto de los capacitores en derivación sobre líneas de distribución .....	15
4	Comportamiento del voltaje con el uso de bancos de capacitores .....	16
5	Esquema de conexión de un banco de capacitores de 2 unidades por fase .....	18
6	Efecto del regulador de voltaje de línea en un circuito de distribución .....	20
7	Diagrama simplificado de conexión del LDC .....	23
8	Comportamiento de la tensión con el uso del regulador de voltaje de línea ....	26
9	Coordinación de reguladores en cascada en una línea de distribución primaria	27
10	Diagrama de conexión de 3 reguladores de voltaje conectados en Y de 4 hilos	28
11	Diagrama unifilar de una subestación con 3 circuitos con regulación individual	29
12	Esquema simplificado de conexión de un cambiador de derivación bajo carga..	30
13	Diagrama vectorial que representa el aumento de la sección de un conductor...	32
14	Diagrama unifilar de ubicación geográfica de las líneas de distribución primaria del circuito 83 .....	50
15	Curva de demanda horaria diaria del circuito 83 .....	51
16	Perfil de voltaje de las condiciones iniciales del circuito .....	54
17	Perfil de voltaje al instalar el regulador tipo subestación .....	59
18	Perfil de voltaje al instalar un regulador de voltaje de línea .....	62
19	Perfil de voltaje que resulta al efectuar cambio de conductores .....	66
20	Perfil de voltaje al instalar bancos de capacitores en derivación afuera de la subestación .....	70

## TABLAS

No.	Título	Pág.
I	Caídas de tensión permisibles respecto a las tensiones nominales en los puntos de entrega de energía .....	3
II	Efectos de la variación de voltaje en cargas resistivas y motores .....	4
III	Efectos de la variación de voltaje en cargas electrónicas y de iluminación .....	5
IV	Clasificación de los métodos de regulación comúnmente empleados en sistemas de distribución .....	11
V	Parámetros de las líneas del circuito 83 .....	52
VI	Resumen del flujo de carga que se obtiene de las condiciones iniciales del circuito .....	53
VII	Resumen del flujo de carga que se obtiene al instalar el regulador tipo subestación .....	58
VIII	Resumen del flujo de carga al instalar un regulador de voltaje de línea .....	61
IX	Costos de inversión que involucra la instalación de reguladores de voltaje afuera de la subestación .....	64
X	Resumen del flujo de carga al efectuar cambio de conductores .....	65
XI	Resumen del flujo de carga al instalar banco de capacitores en la subestación .	67
XII	Resumen del flujo de carga al instalar bancos de capacitores afuera de la subestación en los nodos 651 y 558 .....	69
XIII	Resumen del flujo de carga al instalar bancos de capacitores afuera de la subestación .....	69
XIV	Costos de inversión que involucra la instalación de bancos de capacitores .....	72
XV	Comparación económica de la relación beneficio/costo de los métodos de regulación de voltaje .....	73
XVI	Cálculo de factores de pérdida .....	79

## LISTA DE SÍMBOLOS

P	Potencia activa (kW)
Q	Potencia reactiva (kVAr)
S	Potencia aparente (kVA)
$1\phi$	Línea monofásica
$3\phi$	Línea trifásica
$\cos \phi$	Factor de potencia
	Cuchilla seccionalizadora
	Regulador de voltaje
	Transformador de corriente
	Tierra física
	Capacitor de potencia
	Devanado serie del regulador de voltaje
	Pararrayo
	Impedancia (Z)
	Transformador de potencia

## GLOSARIO

- Análisis de beneficio/costo** Es un método analítico para resolver problemas de selección de inversión, el cual permite analizar los desembolsos o gastos desde el punto de maximizar los beneficios.
- Carga** Potencia eléctrica demandada en cualquier instante por una instalación eléctrica o un elemento específico de ella, la cual puede ser medida en términos de kW, kVAr ó kVA.
- Capacitor elemental** Una parte indivisible del compensador de reactiva consistente de dos electrodos separados por un material dielectrico.
- Costos futuros** Si el punto de referencia para el cálculo de los costos es el presente, entonces todos los costos que se pueden incurrir en el futuro se llaman costos futuros. En virtud de que se incurre en ellos en el futuro, rara vez se conocen con certeza, por lo que se deben estimar.
- Costo de inversión** El costo de un bien, lo constituye el conjunto de esfuerzos y recursos que han sido invertidos con el fin de producirlo (la inversión está representada en recursos ó en capital, en tiempo, y en esfuerzo o sacrificios).
- Costo inicial** Es la inversión que se requiere para que un producto quede listo para satisfacer la necesidad para la cual fue concebido.



- Demanda** Es la carga en las terminales receptoras de una instalación o sistema, promediada en un intervalo de tiempo particular (usualmente 15 segundos).
- DPAS** (Distribution Primary Analysis System), software utilizado para análisis de sistemas eléctricos de distribución.
- Factor de carga** Se define como la relación entre la demanda promedio en un tiempo dado y la demanda máxima que se observa en ese mismo tiempo ( $F_c = D_{prom} / D_{max}$ ).
- Factor de pérdidas** Para un sistema se define como la relación entre el valor medio y el valor máximo de potencia disipada en pérdidas en un tiempo dado.
- Regulador de voltaje** Es un auto-transformador, provisto de un control electrónico que detecta la necesidad de corrección de voltaje y un cambiador de derivaciones accionado por un pequeño motor que proporciona automáticamente una elevación o disminución del voltaje.

## INTRODUCCIÓN

Día con día, la demanda de energía eléctrica en las áreas rurales o poblaciones pequeñas crece considerablemente, por lo que es evidente, la necesidad de mantener el voltaje de servicio dentro de los límites que establecen las normas, tanto para las empresas que distribuyen o prestan el servicio, como para los consumidores. Esto sufren material y económicamente las consecuencias de un voltaje demasiado pequeño o demasiado grande. En el primer caso, porque los aparatos utilizados trabajan inapropiadamente: sus lámparas no iluminan con la intensidad requerida, los motores se calientan más de lo necesario; en el segundo caso, porque ese mismo equipo disminuye su vida útil.

En lo que se refiere a las empresas suministradoras de energía, saben que una disminución de voltaje además de representar una imagen negativa, trae como consecuencia excesivas pérdidas de potencia en las líneas del sistema, mientras que una tensión excesiva puede dar motivo a multas o baja eficiencia del equipo de transformación.

Actualmente, existen varias opciones para mejorar la regulación de voltaje, que se pueden poner en práctica en los sistemas de distribución; sin embargo, algunas de ellas son más efectivas, otras son de menor costo, otras se ponen en práctica más rápidamente y otras son de mayor alcance en el tiempo.

De los anteriores sumarios breves, es evidente que es necesario estudiar las opciones de regulación que para este propósito existen, así como examinar cual de ellas es la que más conviene en un sistema determinado, tomando en cuenta su grado de

confiabilidad, eficiencia así como su eficacia, lo que redundará en beneficios tanto para la compañía que distribuye el servicio como para los consumidores.

Este trabajo tiene como fin principal hacer un análisis técnico y económico entre los diferentes métodos para mejorar la regulación de voltaje. Respecto al análisis técnico se toma en consideración el grado en que se mejora la calidad del servicio en cuanto a voltaje se refiere, mientras que el aspecto económico toma en consideración el beneficio de ahorro de pérdidas de potencia y el costo que conlleva la implementación de un método particular. La decisión se basa en una evaluación de beneficio-costos, para encontrar la alternativa que mejor combine las ventajas técnicas de la solución con los costos y beneficios asociados.

Para hacer la evaluación técnica y encontrar el beneficio del ahorro de pérdidas de una opción particular, es de interés simular el flujo de potencia por el circuito del sistema de distribución que cubre las áreas rurales. Esto se consigue por medio de un paquete de software provisto de algoritmos sofisticados, que facilitan los cálculos inherentes a cada una de las opciones para mejorar la regulación de voltaje. Finalmente, como es deber de los ingenieros realizar las propuestas pertinentes a la resolución de algunos problemas metodológicos que surgen en el campo de las redes de distribución, espero cubrir un vacío con el aporte de este trabajo.

# **1. REGULACIÓN DE VOLTAJE EN LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN RURAL**

## **1.1 Características generales de las líneas de distribución rural**

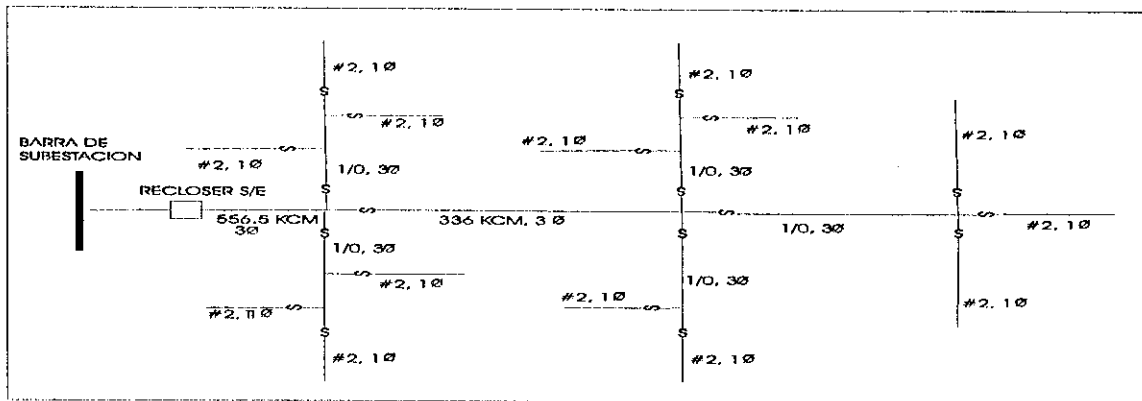
### **1.1.1 Topología del circuito**

Los circuitos eléctricos del sistema de distribución de energía en las áreas rurales ó poblaciones pequeñas, son radiales, generalmente monofásicos en la mayor parte final de su recorrido, son alimentados a una tensión de 13.2 kV, y se extienden a lo largo y ancho del territorio rural afín de atender la demanda de energía, por lo que poseen una longitud considerable. La figura 1 muestra un diagrama unifilar simplificado para un circuito de distribución con el cual se puede comprender mejor la topología.

En estos circuitos los alimentadores primarios que parten de la subestación de distribución son trifásicos, y en el trayecto de su recorrido existen derivaciones que son: monofásicas, bifásicas ó trifásicas. Las derivaciones monofásicas generalmente se encuentran en la parte final de los recorridos, y son los que en su mayoría cubren la demanda de energía de consumidores rurales.

No existe ninguna regla clara y concisa que explique en que parte de la trayectoria de un circuito están ubicadas las cargas del área rural, ya que muchos circuitos de distribución que se encuentran en la periferia del área metropolitana generalmente cubren la demanda de energía de áreas urbanas y de áreas rurales, pero en general, se puede afirmar que geográficamente las líneas eléctricas del área rural están ubicadas en zonas alejadas de la influencia de los sistemas centralizados de distribución.

Figura 1. Diagrama unifilar simplificado de un circuito de distribución de energía que alimenta áreas urbanas y rurales



### 1.1.2 Conductores

Tal como se puede observar en la figura 1, el calibre de los conductores para los circuitos de distribución, varía de acuerdo al tamaño y necesidades de la carga, pero en general son utilizados:

556.5 AAAC

336.4 ASC, ACSR

4/0 ASC, ACSR

1/0 ACSR

2 ACSR

### 1.1.3 Tipo de carga

En un circuito de distribución rural usualmente el tipo de carga es monofásica, su magnitud y concentración puede diferir de una determinada región a otra, por lo que una estimación definida de la carga promedio resulta muy difícil, en el caso del

departamento de Guatemala la densidad típica de carga que caracteriza a estos circuitos es del orden de 0 a 500 kVA/km<sup>2</sup>.

## 1.2 Caídas de tensión permisibles

De acuerdo a las normas técnicas de calidad de los servicios eléctricos, dictadas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, las tolerancias admitidas en la desviación porcentual, respecto de las tensiones nominales en los puntos de entrega de energía eléctrica, serán las indicadas en cada una de las etapas de transición y de régimen, según se indica en el artículo 24 de las Normas Técnicas del Servicio de Distribución, la tabla I muestra estos valores.

Tabla I. Caídas de tensión permisibles respecto a las tensiones nominales en los puntos de entrega de energía

TENSION	TOLERANCIA ADMISIBLE RESPECTO DEL VALOR NOMINAL, EN %					
	ETAPA					
	TRANSICION		REGIMEN		REGIMEN	
			A partir del mes 1 hasta el 12		A partir del mes 13	
	SERVICIO URBANO	SERVICIO RURAL	SERVICIO URBANO	SERVICIO RURAL	SERVICIO URBANO	SERVICIO RURAL
BAJA	12	15	10	12	8	10
MEDIA	10	13	8	10	6	7
ALTA	TRANSICION		REGIMEN		REGIMEN	
			A partir del mes 1 hasta el 12		A partir del mes 13	
	7		6		5	

FUENTE: Normas Técnicas del Servicio de Distribución –NTSD–.

### 1.3 Importancia de la regulación de voltaje

Todos los aparatos eléctricos están diseñados para operar a un cierto voltaje denominado voltaje nominal, la operación óptima de los dispositivos se obtiene cuando el voltaje aplicado es el nominal. Un voltaje diferente al nominal, adversamente afecta la operación del equipo eléctrico, siendo la afección mayor mientras mayor sea la desviación del voltaje respecto al valor nominal.

#### 1.3.1 Cargas resistivas y motores

Muchos equipos utilizados por los clientes residenciales rurales vienen bajo la clasificación de cargas resistivas, entre estos equipos se encuentran: planchas, calentadores de agua, etc. Un voltaje menor al nominal aplicado a estos equipos incrementa el tiempo de calentamiento requerido y muchos tienen un funcionamiento insatisfactorio. Por otro lado un alto voltaje mayor al nominal es probable que queme los elementos de calefacción y dañe los equipos.

Tabla II. Efectos de la variación de voltaje en cargas resistivas y motores

TIPO DE CARGA	RESISTIVAS (planchas, calentadores de agua, etc.)	MOTRICES (lavadoras mecánicas, bombas de agua, etc.)
BAJO VOLTAJE	1. Mayor tiempo de calentamiento.	1. Incremento de la corriente en la línea, baja excitación del motor. A. RESULTADOS a. Reducción de la vida útil. b. Disminución de la eficiencia. c. Recalentamiento del motor.
ALTO VOLTAJE	1. Menor vida de los equipos.	1. Sobreexcitación del motor, incremento del torque. A. RESULTADOS a. posible daño al acople.

Algunos clientes rurales utilizan la energía eléctrica para el accionamiento de bombas de riego, ordeño mecanizado y otras actividades, usualmente estos aparatos son motores de inducción monofásicos, tales equipos, en condiciones de bajo voltaje sufren un funcionamiento defectuoso presentando calentamiento en los devanados de los motores, reduciendo su vida útil y el rendimiento de las labores agropecuarias. Además, altos voltajes sobreexcitan los motores, incrementando el torque, que puede causar daño al acople o al mismo equipo. Ver tabla II.

### 1.3.2 Cargas electrónicas e iluminación

La mala recepción en los televisores instalados muchas veces es resultado de un bajo voltaje. Altos voltajes aplicados cortan la vida de los dispositivos electrónicos en radios, televisores y otras cargas electrónicas utilizadas comúnmente en los hogares.

En lo que se refiere a iluminación, el bajo voltaje decrementa la eficiencia de las lamparas incandescentes y fluorescentes, las lamparas no iluminarán con la intensidad requerida y si el voltaje es suficientemente bajo las lamparas fluorescentes no operaran. Además, altos voltajes disminuyen la vida útil de cada uno de ellos. Ver tabla III.

Tabla III. Efectos de la variación de voltaje en cargas electrónicas y de iluminación

TIPO DE CARGA	ELECTRONICAS (radio y televisión)	DE ILUMINACION (lamparas incandescentes y fluorescentes)
BAJO VOLTAJE	1. Mala calidad de recepción de señales en televisores. a. Imágenes no bien definidas. b. Decremento del tamaño de las imágenes.	1. Disminución de la eficiencia de lamparas incandescentes (10% de reducción de voltaje reduce un 70% la iluminación normal de salida). 2. Las lamparas fluorescentes no operaran.
ALTO VOLTAJE	1. Reducción de la vida de los elementos electrónicos.	1. La vida de los bulbos decrece.



## **1.4 Ventajas de regular el voltaje**

Un voltaje bien regulado beneficia a la compañía distribuidora de energía eléctrica. Entre los aspectos benéficos del suministro de potencia se pueden mencionar:

1. Aumento de ingresos.
2. Satisfacción del consumidor.
3. Demanda adicional de potencia debido a la satisfacción del consumidor.
4. Incremento de la eficiencia de los equipos de distribución.
5. Menor inversión por kVA distribuido.

Por las anteriores consideraciones, es conveniente y adecuado mantener una buena regulación de voltaje en los sistemas de distribución de energía eléctrica, para lo cual existen diversos métodos.

## **1.5 Causas de la disminución de voltaje**

En un sistema perfecto, el voltaje en todos los puntos a lo largo de las líneas permanece constante. Pero lo ideal es imposible llevarlo a cabo porque todos los elementos y máquinas eléctricas que constituyen el sistema presentan caídas de voltaje en su interior, ésto significa que el voltaje que se obtiene en las terminales de salida de algunos equipos eléctricos, cambia con forme cambia la carga de los mismos. Para propósitos de éste trabajo se analiza la caída de voltaje en las líneas de distribución rural, desde donde se localiza el servicio del primer consumidor hasta donde está localizado el último, aunque se sobreentiende que hay caída de voltaje antes del primer consumidor.

Entonces las causas de la caída de voltaje en una línea de distribución rural, pueden deducirse de la ecuación que permite calcular la caída de voltaje en una línea corta.

$$\Delta V = (S.L / \sqrt{3}.V)(R \text{ COS } \phi + X \text{ SEN } \phi)$$

donde:

$\Delta V$  = caída de voltaje

S = potencia entregada

L = longitud de la línea

V = voltaje

R = resistencia en ohmios/km del conductor

X = reactancia en ohmios/km de las líneas

$\phi$  = ángulo del factor de potencia

De lo anterior, se deduce que, las causas de la disminución de voltaje son: el producto (kVA.km), la resistencia, la reactancia de la línea y el factor de potencia.

## 1.6 Definiciones básicas

En la aplicación de control de voltaje en líneas de distribución es usada cierta terminología, la cual se define a continuación.

Caída de voltaje: es la diferencia de voltaje que hay entre el punto de transmisión y el punto de recepción de una línea, principal o de servicio. La caída de voltaje no es necesariamente la caída a través de la impedancia de la línea, pero si la diferencia en valor absoluto entre el voltaje en el punto de envío y el voltaje en el punto de recepción. La caída en la impedancia  $IZ$  sumado vectorialmente al voltaje en el punto de recepción es igual al voltaje en el punto de envío.

**Voltaje máximo:** es el mayor valor de voltaje medido y promediado en un período de cinco minutos (para verificar la calidad del servicio, el intervalo de tiempo usado por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica es de 15 minutos).

**Voltaje mínimo:** es el menor valor de voltaje medido y promediado en un período de cinco minutos.

**Amplitud de variación de voltaje:** es la diferencia entre el voltaje máximo y el voltaje mínimo.

**Voltaje nominal:** el voltaje nominal de un circuito o sistema es el valor asignado al circuito o sistema para los propósitos de diseño convenientes.

**Voltaje de operación:** el voltaje de operación es el valor a que están referidos la operación y características de comportamiento del equipo, normalmente es el voltaje de placa y también el valor al cual supuestamente se obtiene el comportamiento óptimo.

**Razón de voltaje:** es el voltaje al cual se refieren las características de operación y funcionamiento del equipo.

**Voltaje de servicio:** es el valor medido en el punto de entrega de la energía eléctrica al usuario, el cual generalmente es el último punto del sistema de distribución.

**Voltaje base:** es un valor de referencia de los voltajes nominales de operación de las líneas de transmisión y distribución, equipos de transmisión, distribución y de utilización.

**Voltaje de utilización:** el voltaje de utilización es el valor medido en las terminales de la máquina o equipo. El voltaje de utilización es menor que el voltaje de servicio, esto

es debido a las pérdidas que ocurren en el alambrado que va desde el punto de entrega al usuario hasta el punto de utilización.

Regulación de voltaje: es el porcentaje de caída de voltaje de una línea con referencia al voltaje recibido en el final, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\%reg = [(VRSC - VRCC)/VRCC] * 100 \quad (1-1)$$

donde:

VRSC = voltaje recibido sin carga

VRCC = voltaje recibido con carga

Voltaje de propagación: es la diferencia entre el voltaje máximo y mínimo en un punto particular en el sistema de distribución.

## 2. MÉTODOS PARA MEJORAR LA REGULACIÓN DE VOLTAJE

Existen varias opciones o métodos para mejorar la regulación de voltaje en un sistema de distribución. Algunos métodos elevan el voltaje al principio de las líneas de distribución, automáticamente cuando sube la carga, para mejorar la regulación de voltaje. Otros métodos disminuyen la impedancia entre la fuente y la carga, reduciendo así la caída de voltaje. Al reducir la corriente de carga se obtiene el mismo resultado. El equipo de regulación puede ser instalado dentro de la subestación, o afuera de la misma, en el punto donde el voltaje llega a ser alto o bajo, con el objeto de reducirlo o aumentarlo.

Cada método tiene sus propias características para mejorar la regulación de voltaje, en general se pueden clasificar en dos tipos: a) los que actúan directamente en el voltaje b) los que actúan en las causas que provocan la caída de voltaje, estos últimos actúan sobre la impedancia de la línea, ó la corriente por fase. Los métodos de regulación comúnmente empleados en sistemas de distribución se encuentran listados en la tabla IV.

Algunos de los factores que influyen en la selección de un método de regulación particular son:

- a. El tipo de carga a servir.
- b. El tipo de sistema.
- c. La localización del equipo existente.
- d. La cantidad de corrección necesaria de voltaje.
- e. El área de servicio.
- f. El crecimiento de carga.

Tabla IV. Clasificación de los métodos de regulación comúnmente empleados en sistemas de distribución

CLASIFICACIÓN	MÉTODO
MÉTODOS DE REGULACION QUE ACTUAN DIRECTAMENTE EN EL VOLTAJE	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Instalación de reguladores de voltaje tipo subestación.</li> <li>2. Instalación de reguladores de voltaje afuera de la subestación.</li> <li>3. Cambiador de derivación bajo carga.</li> </ol>
MÉTODOS DE REGULACIÓN QUE ACTUAN EN LAS CAUSAS QUE PROVOCAN LA CAIDA DE VOLTAJE	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Instalación de capacitores en la subestación de distribución.</li> <li>2. Instalación de capacitores en derivación a las líneas.</li> <li>3. Balance de cargas en líneas primarias.</li> <li>4. Incremento de la sección del conductor.</li> <li>5. Transferencia de carga a nuevas líneas.</li> <li>6. Aumento del nivel de voltaje.</li> <li>7. Cambio de líneas de 1<math>\phi</math> a 3<math>\phi</math>.</li> </ol>

Aunque no todos los métodos de regulación mencionados anteriormente pueden ser factibles de implementar en sistemas eléctricos de distribución rural, se hablará a continuación someramente en qué consiste cada uno de éstos.

## 2.1 Capacitores

La característica eléctrica de los capacitores, no importando que se instalen en serie o derivación, es la de proporcionar y absorber la potencia reactiva que se presenta en cargas inductivas, con lo cual se mejora la regulación de voltaje en circuitos de distribución. Al introducir potencia reactiva capacitiva en el circuito, se contrarresta la potencia reactiva inductiva del circuito, disminuyendo la reactancia y por ende la impedancia. Estos equipos además de mejorar la regulación de voltaje, también tienden a mejorar el factor de potencia, de tal modo que decrece la corriente requerida para una carga dada, reduciendo las pérdidas en el circuito.

### 2.1.1 Propiedades eléctricas fundamentales de los capacitores

En un capacitor ideal la corriente adelanta a la tensión en un ángulo de  $90^\circ$ , si dicho capacitor está conectado a un voltaje de E voltios, la corriente tomada del capacitor será:

$$I_c = E / X_c \text{ [amperios]} \quad (2-1)$$

En donde:

$$X_c = \text{reactancia capacitiva} = 10^6 / 2\pi fC \text{ [ohmios]}$$

Siendo en ésta ecuación:

f = frecuencia de la fuente en hertz

C = capacitancia en microfaradios

La corriente  $I_c$  viene dada también por la siguiente expresión:

$$I_c = ckVA / E \text{ [amperios]} \quad (2-2)$$

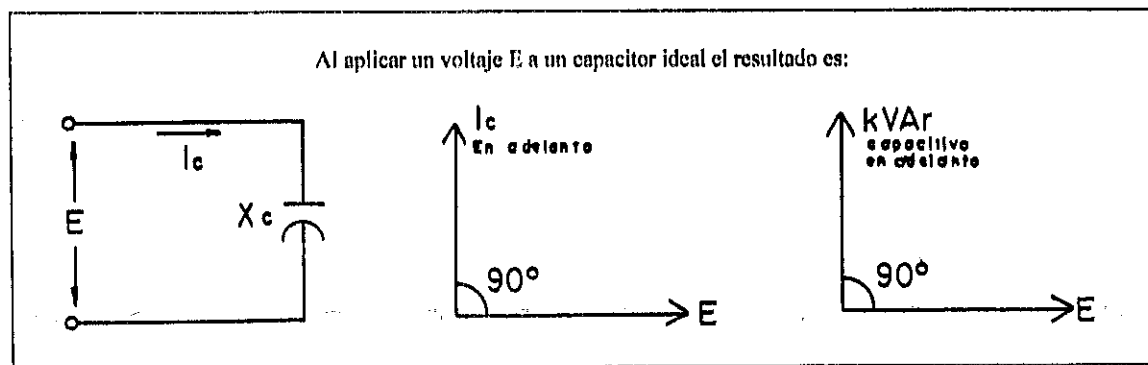
En donde:

ckVA = capacidad del capacitor en kVA

E = voltaje aplicado en kilovoltios

La figura 2 muestra las propiedades eléctricas existentes.

Figura 2. Propiedades eléctricas del capacitor ideal



### 2.1.2 Construcción de los capacitores

Las partes activas de los capacitores de potencia en general son: el papel, hoja de aluminio y una impregnación líquida (material aislante), los cuales están envueltos en

paquetes. Los paquetes están conectados eléctricamente en circuitos serie o paralelo, y el número de tales paquetes determina el voltaje de aplicación y capacitancia de las unidades. Los paquetes están contenidos en un tanque de acero inoxidable, y los conductores son llevados al exterior por medio de bushings de porcelana.

El material dieléctrico no debe ser inflamable, y la construcción interna de los capacitores deberá ser de materiales seleccionados y probados para que aseguren uniformidad de características y se encuentren libres de impurezas.

### **2.1.3 Control para capacitores**

El proceso de control para la operación de un banco de capacitores puede ser manual o automático. Los tipos de inteligencia que se pueden utilizar en el control automático incluyen entre otros: interruptor de tiempo, de voltaje, de corriente, de voltaje-tiempo, de voltaje-corriente, de temperatura, etc. Por su menor costo, se usa el interruptor de tiempo. Existe un cierto parecido entre los mecanismos básicos de control, usualmente en EEGSA son tres los tipos de control utilizados, los cuales traen un sensor de voltaje incorporado, a continuación se hace una breve descripción de éstos mecanismos de control.

Uno de ellos está diseñado para uso en instalaciones de tipo "socket" interiores o a la intemperie. El control viene dotado de dos juegos de manecillas de conexión y desconexión, que permiten dos operaciones completas cada 24 horas. El período mínimo de conexión es de 30 minutos y el período mínimo de desconexión es de 90 minutos. El dispositivo de omisión de conexión impide la conexión del banco de capacitores los días deseados. Los contactos del control son para uso pesado con una capacidad nominal de 35 amperios.

Otro de los tres mecanismos de control, está diseñado específicamente para el control de capacitores en ambientes duros. Se presta especialmente para aplicaciones a la intemperie por estar protegido por una caja hermética de aluminio. Viene de fábrica con



fusible y dos conmutadores (conmutador 1 automático-manual) y (conmutador 2 abrir-neutral-cerrar); el control está dotado de cuerda de emergencia, dispositivo de omisión de conexión y desconexión; y un motor diseñado para operar a 120 voltios y 60 hertz.

El último de los mecanismos de control, se presta para gobernar bancos de capacitores en aquellos casos en que se considera conveniente subordinar el control de tiempo a un control de voltaje en condiciones anómalas de voltaje. Consta de un mecanismo de tiempo, combinado con un instrumento tipo demandómetro que es sensible al nivel de voltaje; éste nivel de voltaje puede ser graduado en porcentaje a los niveles mínimo y máximo de 95 y 135 voltios. Los capacitores entran en línea cuando el voltaje es inferior al voltaje mínimo de graduación del control, y salen de línea cuando el voltaje sobrepasa el valor del voltaje máximo de graduación del control.

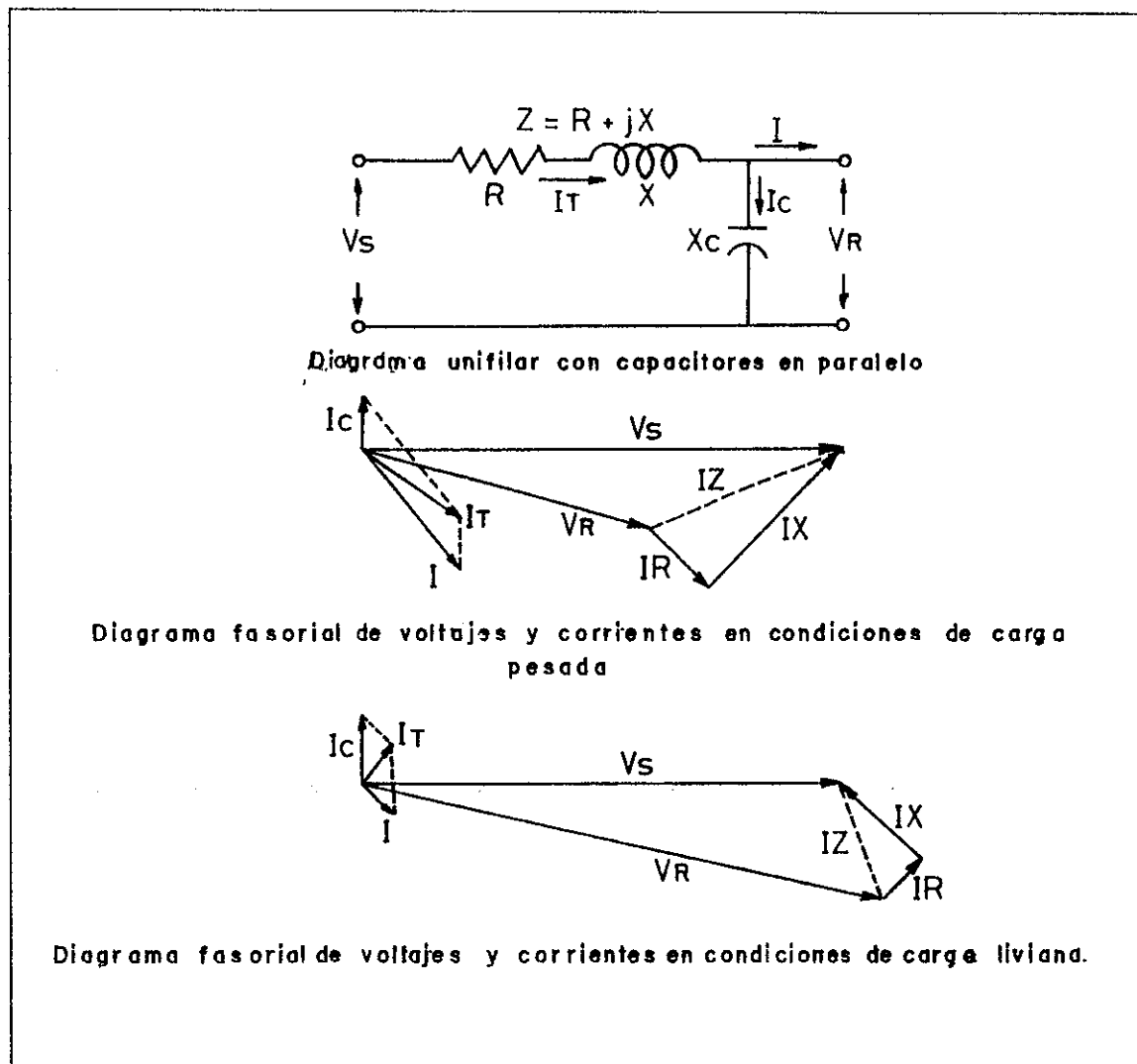
#### **2.1.4 Aplicación de capacitores en derivación afuera de la subestación**

Las líneas eléctricas tienen una impedancia en serie, compuesta de resistencia y reactancia capacitiva e inductiva, distribuida a lo largo. Cuando no hay carga que alimentar en las líneas, el voltaje receptor ( $V_R$ ) al final de la línea iguala al voltaje de envío ( $V_S$ ). Sin embargo, tan pronto la corriente de carga fluye a través de la línea la corriente causa una caída en la resistencia y reactancia, que se sustrae del voltaje de envío, ocasionando un voltaje receptor menor que el voltaje de envío. Con el incremento de carga, la caída en la impedancia se incrementa y el voltaje receptor es más pequeño.

La instalación de capacitores en derivación en una línea de distribución produce una elevación de voltaje entre el punto de ubicación del banco y la subestación de distribución, como la línea está cargada, la corriente de la carga ( $I$ ) se suma vectorialmente con la corriente del capacitor ( $I_C$ ), dando como resultado una disminución de la corriente, la cual estará adelante de la corriente de carga. Esta corriente resultante menor ( $I_T$ ) causa una caída en la impedancia, menor que la que causa la corriente  $I$ . Sin embargo, bajo condiciones de cargas livianas, la adición vectorial de

las corrientes puede producir una corriente resultante que va delante de la corriente de envío. La corriente adelantada causa una caída en la impedancia en tal dirección que el voltaje receptor es más alto que el voltaje de envío, por lo que con estos compensadores se puede estar sujeto a condiciones de alto o bajo voltaje. Por lo tanto, para mejorar la regulación de voltaje, lo ideal sería instalar el banco de capacitores de modo que se pueda conectar y desconectar de acuerdo con las variaciones de la carga; es decir, que permanezca conectado bajo condiciones de carga pesada y desconectado bajo condiciones de carga liviana.

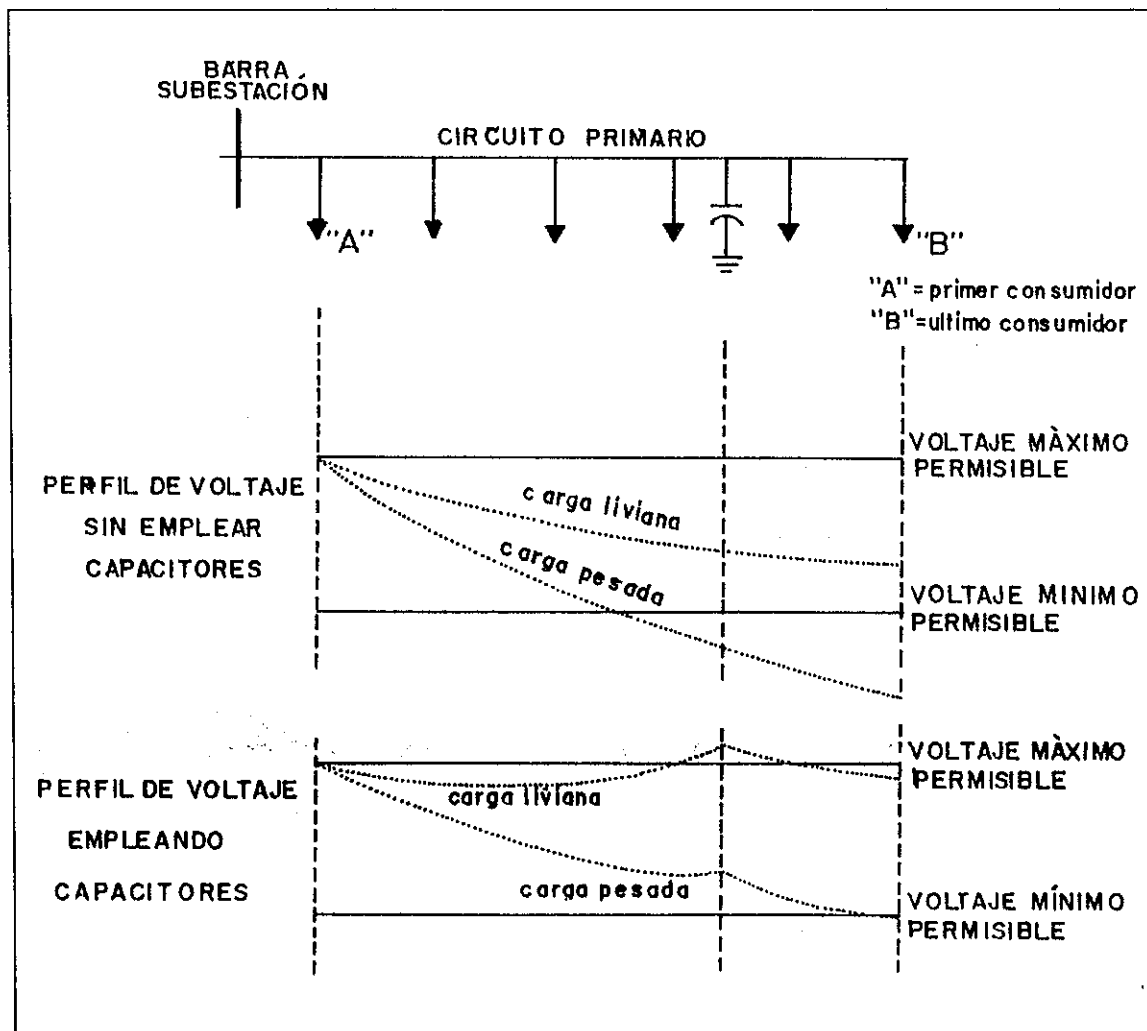
Figura 3. Efecto de los capacitores en derivación sobre líneas de distribución



La figura 3 muestra el diagrama unifilar de líneas con compensación de reactiva y los diagramas vectoriales de voltaje para diferentes condiciones.

Entonces, con la aplicación de un condensador en derivación a la carga, la magnitud de la corriente que se proporciona de la fuente de alimentación a la carga puede ser reducida, el factor de potencia mejorado, y la caída de voltaje entre la fuente de alimentación y la carga es también reducido. Algo muy importante es el hecho de que los compensadores en derivación no afectan a la corriente o el factor de potencia más allá de su punto de aplicación, tal como se puede apreciar en la figura 4.

Figura 4. Comportamiento del voltaje con el uso de bancos de capacitores



El porcentaje de elevación del voltaje debido a un banco de capacitores instalados en una línea de distribución, se deduce de las siguientes ecuaciones:

$$\Delta V_{sc} = I_{sc} * X \quad (2-3)$$

$$\Delta V_{cc} = I_{cc} * X \quad (2-4)$$

En donde:

$\Delta V_{sc}$  = caída de voltaje a lo largo de la línea sin capacitores

$\Delta V_{cc}$  = caída de voltaje a lo largo de la línea con capacitores instalados

$I_{sc}$  = corriente a lo largo de la línea sin capacitores

$I_{cc}$  = corriente a lo largo de la línea con capacitores instalados

$X$  = reactancia de la línea en ohmios/km.

De aquí se deduce que la elevación de voltaje debido al banco de capacitores, es igual a la diferencia entre  $\Delta V_{sc}$  y  $\Delta V_{cc}$ , esto es:

$$\Delta V = \Delta V_{sc} - \Delta V_{cc} \quad (2-5)$$

Si se sustituyen las ecuaciones (2-3) y (2-4) en (2-5), se tiene:

$$\Delta V = (I_{sc} - I_{cc}) * X \quad (2-6)$$

Pero, la diferencia  $I_{sc} - I_{cc}$ , es la corriente tomada del capacitor, la cual está dada por la ecuación (2-2), si se sustituye (2-2) en (2-6) se tiene:

$$\Delta V = (ckVA / E) * X \quad (2-7)$$

En donde:

$ckVA$  = capacidad del banco de capacitores, en kVA

$E$  = voltaje aplicado al banco en kV

Dividiendo la ecuación (2-7) por  $E$ , para encontrar el porcentaje de elevación del voltaje debido al banco de capacitores, y se multiplica por 100, se tiene:

$$\% \text{ aumento de voltaje} = [(ckVA)(d)(X)] / [(10)(E^2)] \quad (2-8)$$

En donde:

$ckVA$  = capacidad del capacitor trifásico en kVA

$d$  = distancia en kilómetros desde la subestación al banco de capacitores

$X$  = reactancia de la línea en ohmios/km.

$E$  = voltaje entre líneas, expresado en kilovoltios

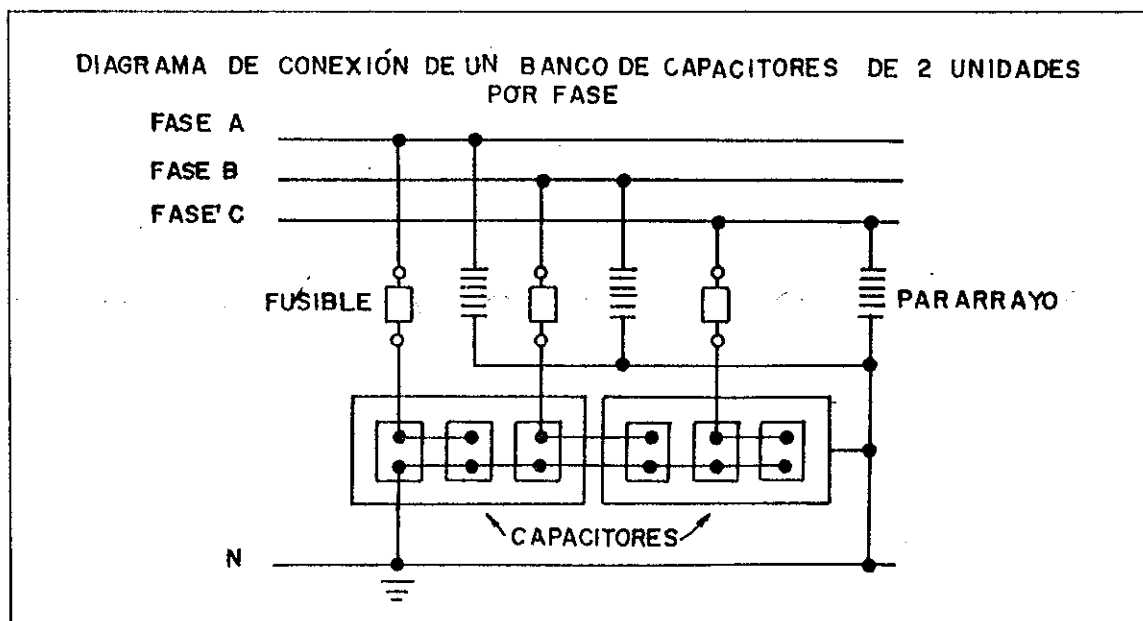
Si la instalación del capacitor es monofásica, ckVA será igual a los ckVA monofásicos instalados; E será el voltaje entre los dos conductores y X será igual al doble del valor del conductor.

### 2.1.5 Aplicación de capacitores en derivación en la subestación

Los capacitores en derivación pueden también ser instalados en las barras de bajo voltaje de las subestaciones de distribución. Cuando se instalan en las subestaciones, los bancos de capacitores son relativamente grandes y es, generalmente, necesario operarlos para prevenir sobrevoltajes durante las condiciones de carga liviana. El nivel de voltaje de la línea es mejorado, dependiendo sobre todo de la capacidad de cantidad de capacitores conectados a la línea.

El propósito general de instalar capacitores en una subestación es suministrar potencia reactiva, y aliviar la capacidad de la subestación y de la línea de transmisión, y no necesariamente la regulación de voltaje. La fig. 5 muestra la conexión de un banco de capacitores.

Figura 5. Esquema de conexión de un banco de capacitores de dos unidades por fase



### **2.1.6 Factores de aplicación en la instalación de capacitores en derivación**

La selección de la localización y tipos de control de bancos de capacitores, para que alcancen control total en el voltaje y máxima reducción de pérdidas requiere cuidadosas consideraciones, a partir de los datos del sistema en el que operan, entre éstas se pueden mencionar:

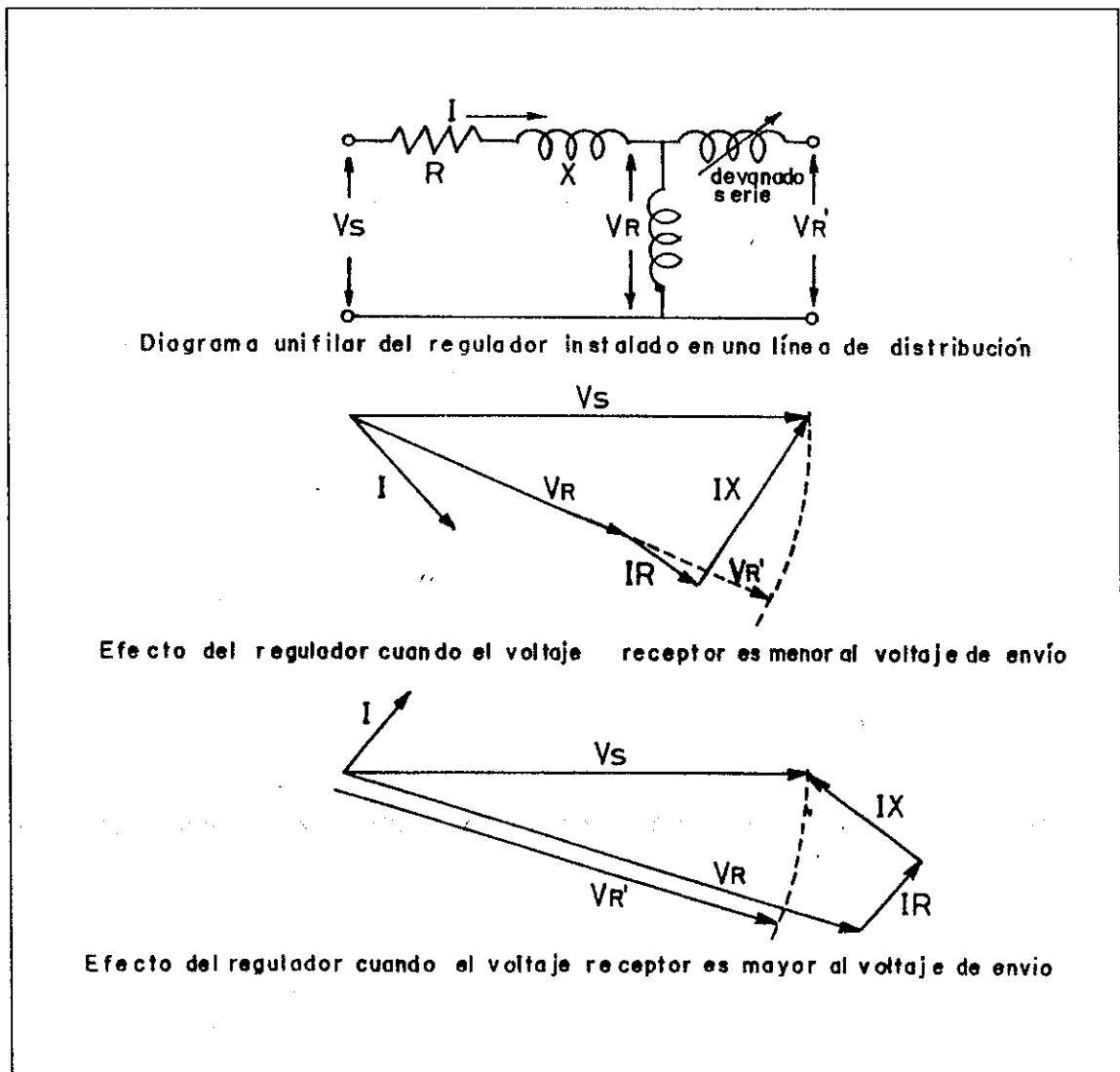
1. Determinar la variación, de kW o kVAr (preferiblemente por instrumentos gráficos) por subestación y cada alimentador de salida, para un período típico de 24 horas en cargas diarias mínimas y máximas. Usualmente el mínimo reactivo kVAr determina la capacidad de capacitores fijos.
2. Obtener medidas de voltaje efectivas en los alimentadores durante carga máxima y liviana en un número suficiente de puntos para determinar la localización óptima de los capacitores. Los capacitores en derivación fijos aumentan el nivel de voltaje en los puntos donde ellos son aplicados.
3. Es deseable suministrar los kVAr requeridos por la carga tan próximos a la carga como sea posible para reducir las pérdidas en el alimentador. Por lo tanto, las unidades de capacitores serán ubicadas en los centros de carga o cercanos al final de los alimentadores. Idealmente cada punto de carga tendría la cantidad de kVAr del capacitor para suministrar los kVAr necesarios a la carga, sin embargo, esto no es posible, porque en la práctica son utilizadas unidades estándar.
4. Calcular la reducción de pérdidas en kW y la reducción de pérdidas en kVAr en el alimentador.
5. Calcular la capacidad de los alimentadores en kW y kVA para los kVAr del capacitor instalado. Esto puede envolver capacitores instalados en varios puntos sobre el alimentador dado.

De los anteriores sumarios breves en la aplicación de capacitores en derivación en sistemas de distribución, es evidente que no pueden haber expuestas reglas fijas en la localización de capacitores. Cada caso es diferente y requiere un estudio completo.

## 2.2 Reguladores de voltaje

Los equipos reguladores de voltaje, también llamados reguladores de voltaje de pasos, trabajan igualmente bien en condiciones de alto voltaje o bajo voltaje. El equipo toma el sobrevoltaje o el bajo voltaje y lo transforma al valor apropiado. En la figura 6 se muestra el diagrama unifilar de un equipo regulador instalado al final de los alimentadores y su operación se muestra a través de los diagramas vectoriales.

Figura 6. Efecto del regulador de voltaje de línea en un circuito de distribución



Como se puede observar en la figura 6, el equipo corrige el voltaje receptor ( $V_R$ ) al valor ( $V_R'$ ) que es igual al voltaje de envío,  $V_R$  y  $V_R'$  se encuentran en fase, ya que el regulador no es más que un autotransformador, por tanto, el principio que se aplica a la inducción de voltaje en el devanado serie del regulador, debido al voltaje  $V_R$  aplicado, es el mismo que para un transformador.

Los reguladores de voltaje han recibido gran aceptación, ya que son de simple aplicación, dan la corrección necesitada con tolerancias muy cercanas para ambas condiciones de alto voltaje y bajo voltaje, su aplicación es muy flexible, etc. Ya que son de uso general, es indispensable para los ingenieros y operadores de un sistema tener una básica comprensión de su teoría y funcionamiento.

### **2.2.1 Descripción breve de un regulador de pasos**

El regulador de pasos es un autotransformador regulador monofásico, provisto de un control electrónico que detecta la necesidad de corrección del voltaje, y un cambiador de derivaciones accionado por un pequeño motor que proporciona automáticamente una elevación o disminución del voltaje en pasos discretos de amplitud.

Podemos encontrar, entre otros, reguladores de 4 pasos, con un rango de regulación de 6 o 10%, cada paso representa un cambio de voltaje de 1.5% en las unidades de 6% y 2.5% en las de 10%. En nuestro medio comúnmente se emplean reguladores de 32 pasos, de los cuales 16 son hacia arriba e igual número de pasos hacia abajo, con una amplitud de regulación de  $\pm 10\%$ .

### **2.2.2 Control para el regulador de voltaje**

El control para la operación de un regulador de voltaje puede ser manual o automático. El regulador controlado manualmente tiene muy poca utilidad, solamente podría utilizarse en una subestación con personal permanente de supervisión, que



controle el voltaje y la operación manual del regulador con el objeto de mantener constante el voltaje a la salida de la subestación. Por lo que es imperativo tener la posición del tap del regulador controlado automáticamente con un exacto dispositivo de control que sea sensible a la salida del voltaje del regulador.

El circuito de control para los reguladores, posee entre otros elementos, un circuito sensor de voltaje (VSC), que no es más que un circuito de estado sólido, que tiene la función de establecer el punto de balance del voltaje, este por lo tanto, es sensitivo al voltaje regulado de salida.

Entonces, el control para la operación del regulador, trata de mantener el voltaje de salida en un valor casi constante, si el voltaje de entrada es bajo o alto, el control causará la operación del regulador en la dirección de aumento o disminución, según sea el caso, hasta que se alcance el voltaje deseado.

Es de hacer notar que muchas variaciones momentáneas de voltaje como las causadas por el arranque de motores, son de tan corta duración que el corregirlas originaría únicamente mayores variaciones de voltaje, (aún cuando ésta variación este fuera del ancho de banda fijado) por lo que, con el objeto de mantener el mejor voltaje promedio, un retardo de tiempo es incorporado en la secuencia de operación del control, así, variaciones de voltaje de menor duración que el retardo de tiempo del relevador no serán corregidas.

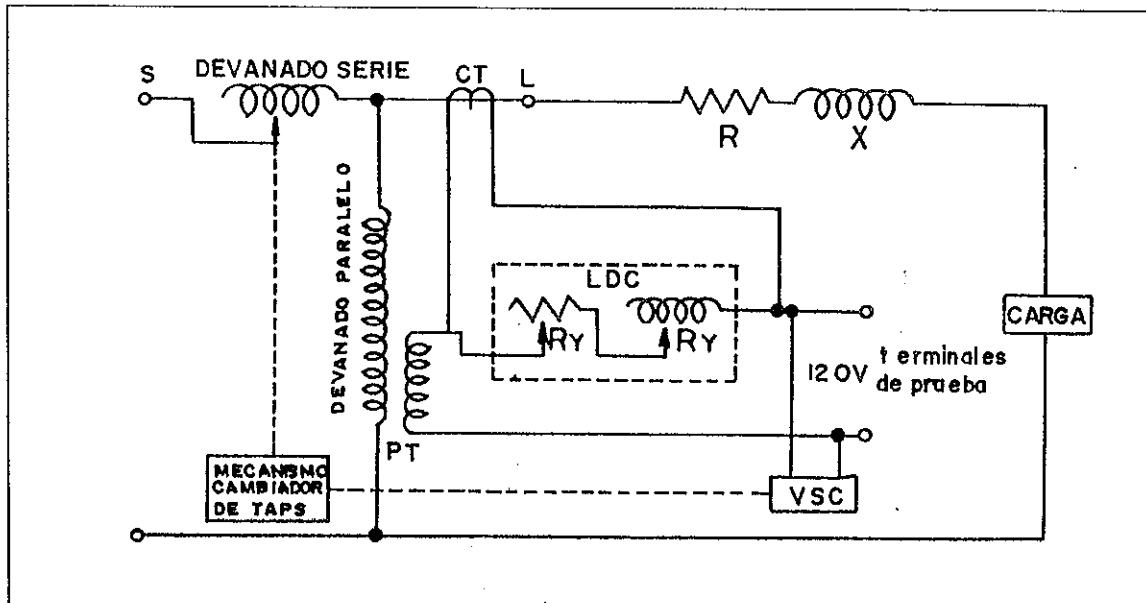
### **2.2.3 Compensador de caída de línea**

Generalmente los reguladores se instalan a una remota distancia del centro de carga. Aún cuando el regulador mantiene automáticamente constante el voltaje a su salida, la corriente que demanda la carga y que circula por la línea desde el regulador hasta la carga, origina una caída adicional de voltaje, los reguladores estándar (de 32

pasos) pueden corregir ésta caída de voltaje por medio de un ajuste apropiado del compensador de caída de línea (LDC por sus siglas en inglés: Line Drop Compensation).

El LDC se usa para ajustar la caída de voltaje producida por la resistencia y reactancia de la línea, esto se logra ajustando en el LDC la resistencia y reactancia equivalente al de la línea, con lo que se simulan las características eléctricas de las líneas. La conexión del LDC se puede observar a través del diagrama de la figura 7.

Figura 7. Diagrama simplificado de conexión del LDC



### 2.2.3.1 Ajuste del LDC

Para realizar el ajuste adecuado del LDC, debe conocerse los valores de resistencia ( $r$ ) y reactancia ( $x$ ) del tramo de la línea desde el regulador hasta el centro de carga; además, de los valores de corriente a carga máxima, así como tener los datos de relación del CT y PT.

El valor de  $R$  y  $X$  ajustada en voltios en el regulador de voltaje se determina aplicando la siguiente fórmula:

$$(R + jX) = [(relación\ del\ CT)/(relación\ del\ PT)] *(r+jx)\ ohms \quad (2-9)$$

Existen además métodos simplificados para ajustar el LDC. Esto se logra estableciendo una comunicación directa entre el regulador y el centro de carga; ajustando la resistencia y reactancia de acuerdo a una relación predeterminada R:X. Este ajuste deberá ser realizado durante el período de carga pico. Esta relación R:X deben ser determinadas por las distancias empleadas comúnmente, para los diferentes calibres de conductores que sean empleados, estas relaciones son:

Calibre del conductor	relación R:X
# 4	2:1
#2 a #1	1:1
#2/0 a #3/0	1:1.5
#4/0	1:2
350 MCM	1:4
500 MCM	1:5

Para realizar el ajuste del compensador de acuerdo a este método simplificado se siguen los siguientes pasos:

1. Colocar la perilla reguladora en el nivel de voltaje que se desea tener en el centro de carga.
2. Ajustar las perillas aumentándolas de acuerdo a la relación apropiada de R:X
3. Cuando el piloto indica que el voltaje se encuentra en un rango mas bajo que el ancho de banda establecido, detener el ajuste y esperar a que el regulador lo detecte.
4. Continuar ajustando la resistencia y reactancia hasta que el voltaje en el centro de carga se encuentre en el nivel de voltaje deseado. Este voltaje deberá ser el mismo que el ajustado en el regulador.
5. Verificar que el voltaje en el primer consumidor que se encuentra mas allá del regulador, no esté por encima del máximo permisible durante el periodo de carga pico. Si el voltaje al primer consumidor es muy alto, la R y X tendrá que reducirse, de manera que siempre mantenga la relación apropiada.

## 2.2.4 Capacidad de un regulador de voltaje

La capacidad de un regulador de voltaje, viene dado por la siguiente expresión:

$$C = (I)(\Delta V) \quad (2-10)$$

donde:

C = capacidad del regulador en kVA

I = corriente que fluye por el devanado serie del regulador en amperios

$\Delta V$  = Voltaje en el devanado serie en kV

La magnitud de  $\Delta V$  depende del porcentaje de regulación y viene dado por:

$$\Delta V = (\%reg)(V_f) \quad (2-11)$$

donde:

%reg = porcentaje de regulación

$V_f$  = voltaje de fase en kV

### 2.2.4.1 Aumento de la capacidad del regulador

En algunas aplicaciones, no se requiere del 10% de regulación, si éste es el caso, el rango de regulación puede ser reducido por un simple ajuste de los interruptores limitadores e indicadores en la posición adecuada y se podrá incrementar la capacidad de corriente fluyendo por el regulador.

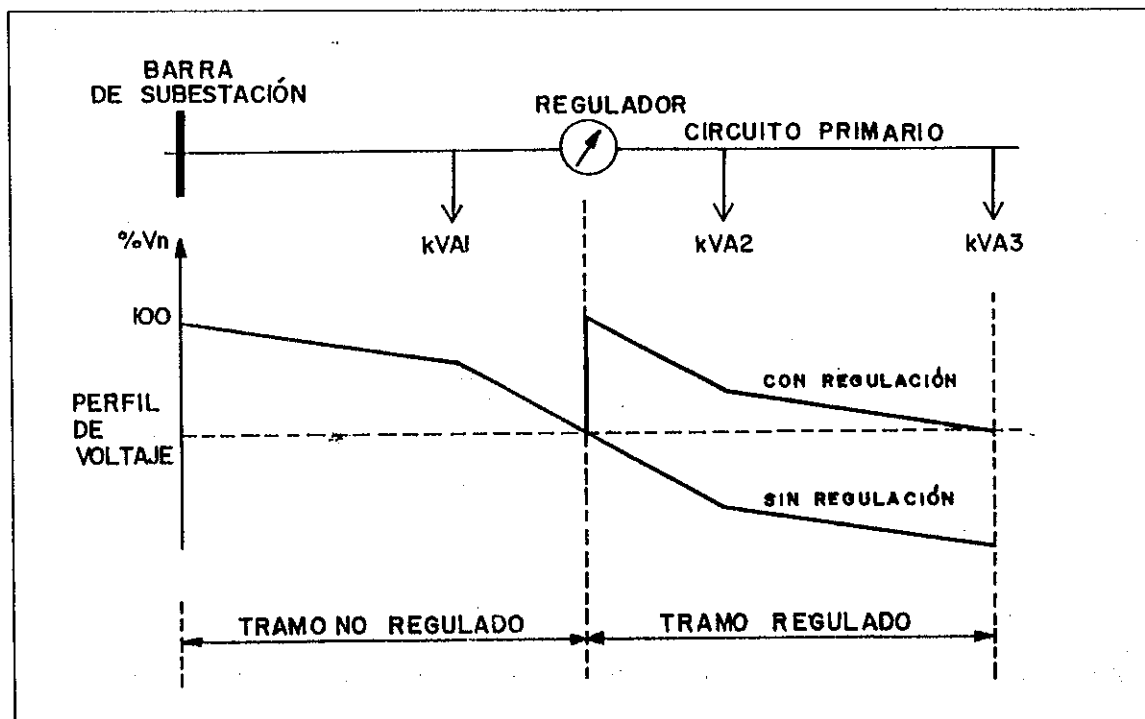
El ajuste del interruptor limitante y el aumento del porcentaje se muestra a continuación:

Regulación	Porcentaje
10%	100%
8 <sup>3</sup> / <sub>4</sub> %	110%
7 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> %	120%
6 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> %	135%
5%	160%

### 2.2.5 Aplicación del regulador de voltaje afuera de la subestación

La instalación de reguladores de voltaje a lo largo de la línea primaria (usualmente llamados reguladores de voltaje de línea) permite corregir la caída de voltaje a través de éstas y reduce la amplitud de voltaje en la acometida del consumidor. Los reguladores deben ser colocados en el punto donde el voltaje, bajo condiciones de carga pesada, cae abajo del valor mínimo deseable, tomando en cuenta el posible crecimiento de la carga. En la figura 8 podemos apreciar el perfil de voltaje de una línea bajo carga pesada con excesiva caída de voltaje y la localización del regulador para corregir la condición de voltaje.

Figura 8. Comportamiento de la tensión con el uso del regulador de voltaje de línea



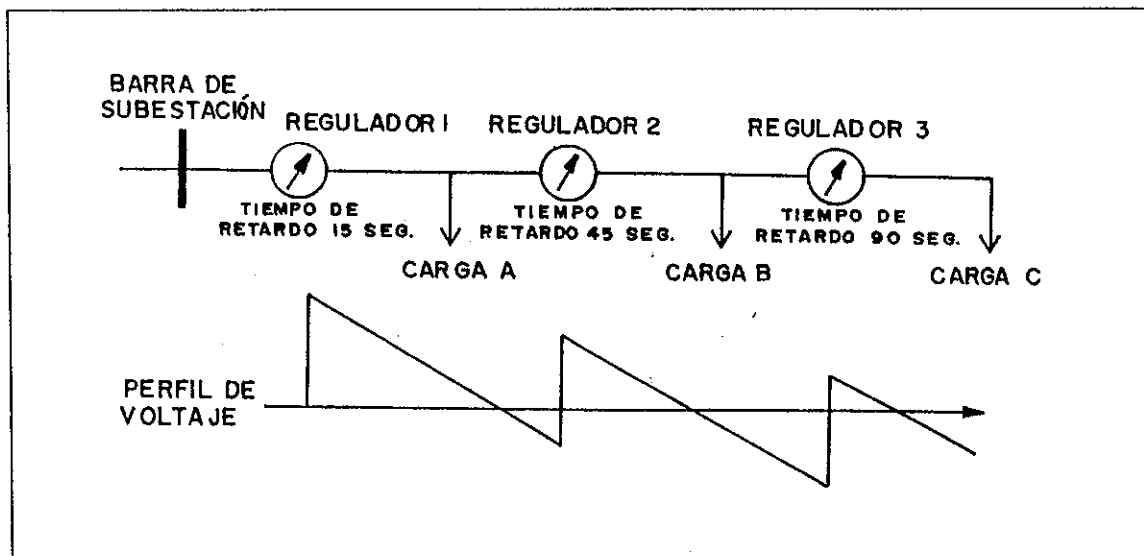
#### 2.2.5.1 Coordinación de reguladores

Para llevar a cabo una buena coordinación entre reguladores conectados en cascada sobre una línea primaria, el ajuste del tiempo de retardo debe ser

progresivamente mayor a medida que nos alejemos de la fuente. Cuando este procedimiento es seguido, el regulador más próximo a la fuente, censa la necesidad de corregir el voltaje, operando para llevar el voltaje dentro del ancho de banda establecido. El regulador más cercano a éste, sentirá esta corrección y por consiguiente ya no operará.

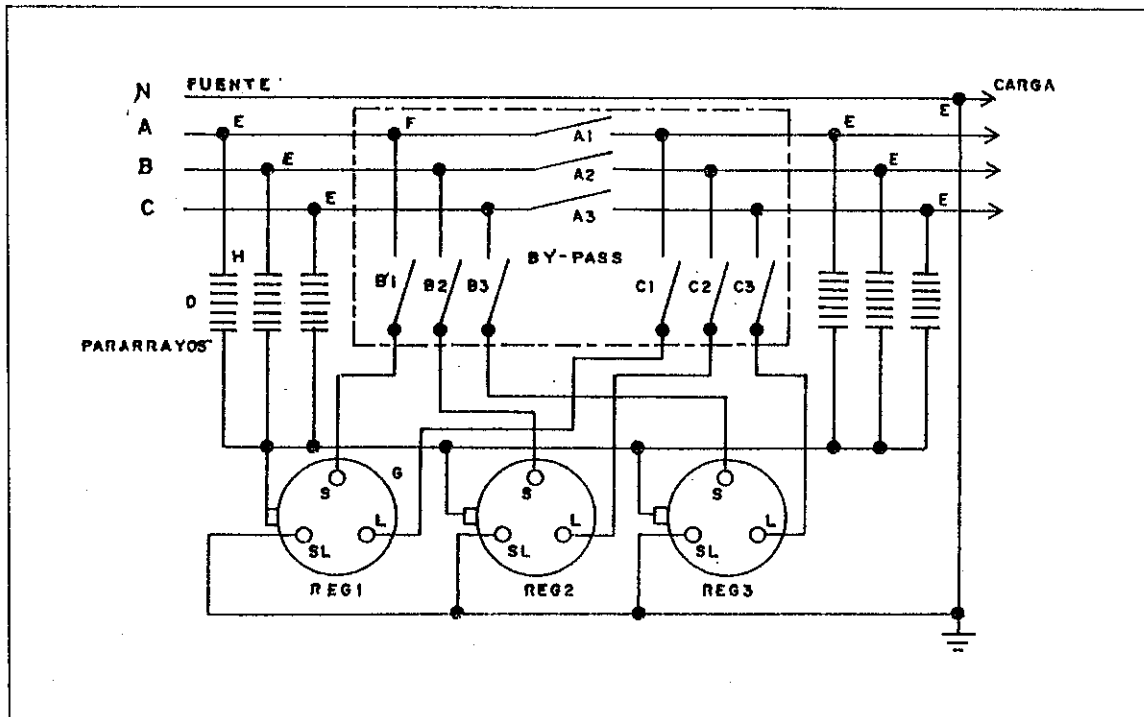
Por ejemplo, en la figura No. 9, un incremento en la carga B, podría causar una caída de tensión que volviera necesaria la corrección del voltaje en el regulador No. 2, sin que el regulador No. 1 vea ésta caída. En este caso, el regulador No. 3 podría también ver la necesidad de elevar el voltaje. Después de un retardo de 45 segundos, el regulador No. 2 operará corrigiendo el voltaje. El regulador No. 3 notará ésta corrección y regresara a su condición inicial sin realizar ninguna operación.

Figura 9. Coordinación de reguladores en cascada en una línea de distribución primaria



La localización de los reguladores dependerá de la variación permisible del voltaje entregado a cada usuario y de la variación total permisible en toda la línea. Además, las conexiones para la instalación son diversas, dependiendo de la aplicación y/o del sistema donde se apliquen. La figura 10 muestra la instalación de tres reguladores monofásicos conectados en estrella en un circuito de 4 hilos.

Figura 10. Diagrama de conexión de 3 reguladores de voltaje conectados en estrella de 4 hilos

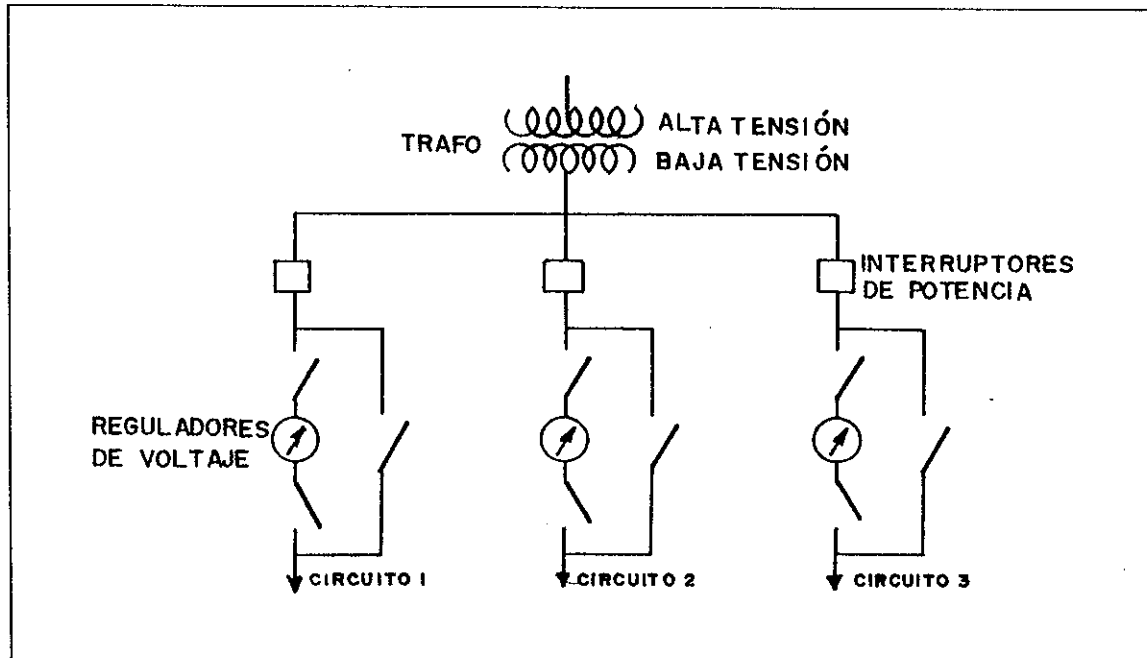


### 2.2.6 Aplicación del regulador de voltaje tipo subestación

A menudo, las subestaciones alimentan diferentes tipos de carga: industrial, comercial, residencial, con ciclos de carga diferentes, longitudes y calibres diferentes, etc. Cuando esto ocurre es muy difícil proporcionar el nivel adecuado de voltaje a cada línea usando la regulación de la barra.

La regulación individual de líneas de distribución es independiente de las necesidades de las otras líneas alimentadas por la barra común, lo que permite alimentar desde una misma subestación líneas con diferentes tipos de carga, calibres, longitudes y distancias al primer consumidor. La figura 11 nos muestra la forma en que estaría colocado cada regulador individual en la subestación.

Figura 11. Diagrama unifilar simplificado de una subestación con 3 circuitos con regulación individual



### 2.3 Cambiador de derivación bajo carga

El mecanismo cambiador de derivación bajo carga (LTC por sus siglas en inglés: Load Tap Changing), es aplicado a transformadores de potencia en la subestación, para mantener constante el voltaje en el lado de baja o secundario, ante una variación del voltaje primario, o tener un voltaje constante de salida a lo largo de la alimentación en el lado de baja, ante variaciones de la carga.

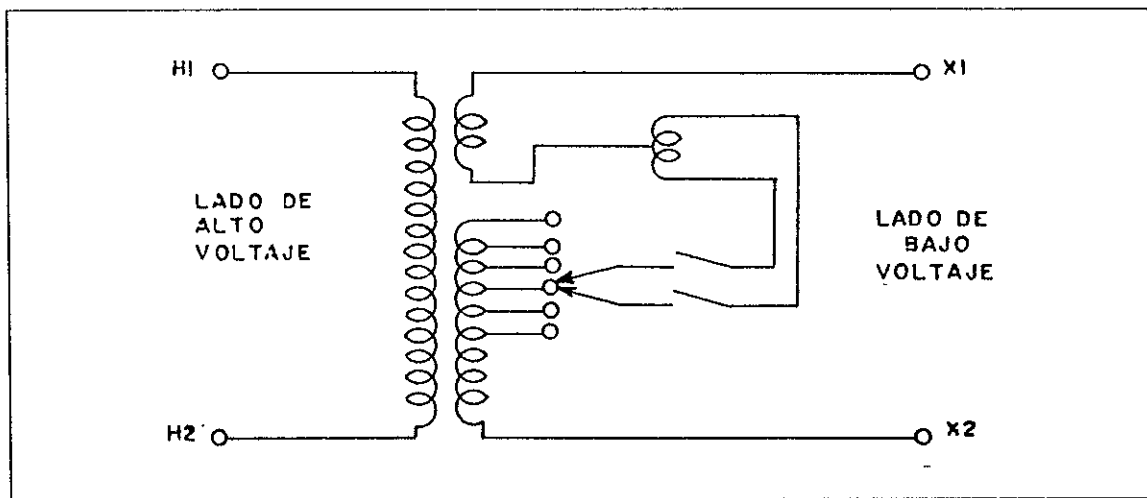
Los cambiadores de derivación bajo carga de los transformadores (a los que comúnmente se hace referencia como transformadores LTC) son en realidad una combinación de un transformador y un regulador del tipo de pasos (la operación del mecanismo de cambio de derivación, es por consiguiente, similar al del regulador de voltaje de pasos). El mecanismo cambiador de derivación va montado dentro de un compartimiento lleno de aceite, que comúnmente está sellado contra todo contacto con el núcleo y las bobinas. El cambio de derivación se efectúa por medio de un interruptor



en aceite, el cual proporciona la regulación del voltaje.  $\pm 10\%$ ,  $\pm 7.5\%$  y  $\pm 5\%$  son porcentajes de regulación típicos para estos equipos.

Cuando la conexión es monofásica, o trifásica en delta, las derivaciones (taps) se sitúan de preferencia en la parte central del devanado (ver figura 12) a manera que se eviten los esfuerzos por voltaje anormal, a los que por lo general, están sujetas las bobinas de los extremos. En la conexión estrella (Y) los taps pueden colocarse en el extremo neutro del devanado, y si el neutro va a ser conectado a tierra sólidamente, resulta posible situar los taps a un lado de la tierra, para usar los cambiadores de carga con aislamiento considerablemente reducido.

Figura 12. Esquema simplificado de conexión de un cambiador de derivación bajo carga



#### 2.4 Balance de cargas en líneas trifásicas

Si en la línea de distribución primaria se tiene una regulación de voltaje muy pobre, se debe controlar en primer lugar la carga en cada una de las fases, si la carga no es similar entre las fases, debemos proceder a efectuar dicho balance. La carga de una línea trifásica está balanceada cuando las corrientes son iguales en las tres fases con una regulación mínima.

Cuando se va a efectuar un balance de carga se debe ejecutar a lo largo de toda la línea, ya que el valor de las corrientes medidas a la salida de la subestación no es un dato suficientemente confiable. Cuando una línea alimenta cargas trifásicas no se encuentra gran dificultad en el balance de la carga.

Cuando se emplea el método de área de fase (una fase de la línea alimenta todos los transformadores del área) es necesario seleccionar áreas de fase tales que la carga en cada fase sea casi igual.

## **2.5 Transferencia de cargas a nuevas líneas**

Al agregar nuevos circuitos en un área considerada, se puede reducir la carga en las líneas, lo cual reducirá la corriente, y por lo tanto, se reducirá la caída de voltaje. Este método no se emplea específicamente para mejorar la regulación de voltaje, pero forma parte del estudio de un plan general de crecimiento de carga.

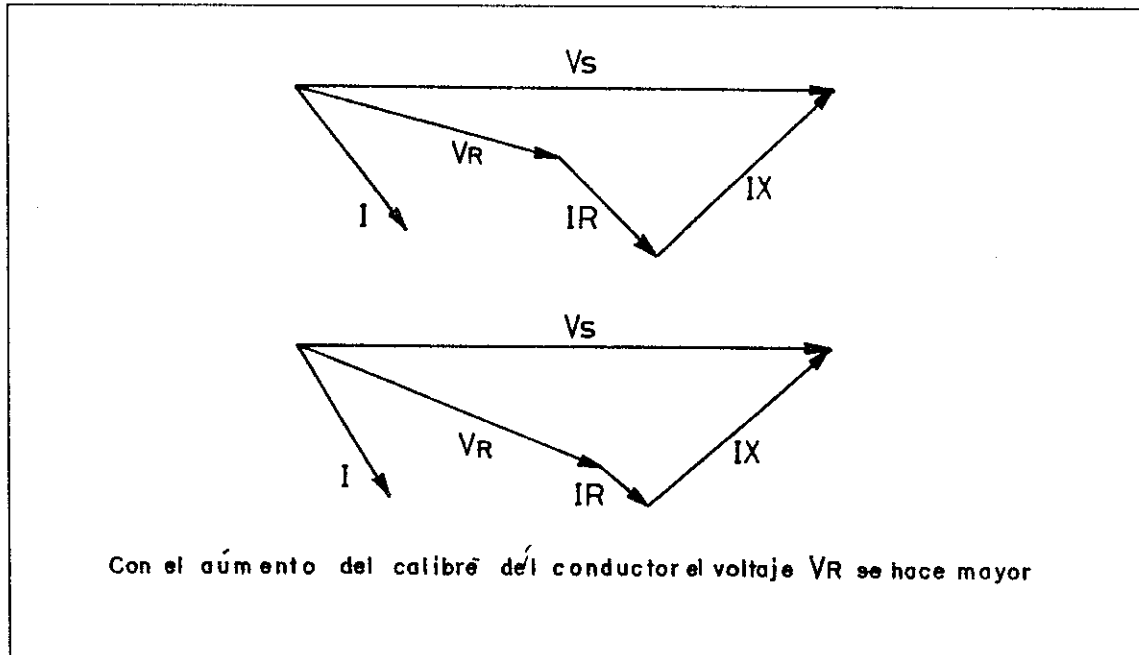
## **2.6 Incremento de la sección del conductor**

Como se mencionó anteriormente, cuando un alimentador está cargado, la corriente que fluye a través de estos causa una caída de voltaje en la impedancia que se sustrae del voltaje de envío ( $V_S$ ), resultando una condición de bajo voltaje en el punto receptor ( $V_R$ ). Por lo tanto, reduciendo la resistencia en serie de la línea minimizamos la caída de voltaje. La reducción de la resistencia se puede llevar a cabo tendiendo conductores de sección transversal mayor, esto es, aumentar el calibre de los conductores existentes. Además, la disminución de la resistencia del conductor se puede conseguir reduciendo la longitud del circuito.

El aumento del calibre de los conductores, no afecta la caída en la reactancia, pero disminuye la impedancia total, en consecuencia el voltaje receptor es mayor, esto se representa gráficamente en la figura 13. Hay que tomar en cuenta que con el aumento

del calibre de los conductores, se aumenta el peso y, por tanto, la tensión mecánica en las líneas.

Figura 13. Diagrama vectorial que representa el aumento de la sección de un conductor



## 2.7 Cambio de líneas de monofásico a trifásico

Las líneas de distribución primaria tienen muchas derivaciones en una sola fase y la caída de voltaje también está en función de la trayectoria de retorno. Si en una derivación monofásica se agregan dos conductores y se forma una línea trifásica con 4 hilos, además se divide la carga existente igualmente entre las tres fases, entonces, la caída de voltaje se reduce a la sexta parte del valor en una sola fase, esto se demuestra a continuación:

Para un circuito monofásico la caída de voltaje será:

$$\Delta V(1\phi) = 2iZ \quad (2-12)$$

En donde:

$\Delta V$  = caída de voltaje por unidad de longitud del circuito en voltios

$i$  = intensidad de la línea en amperios

$Z$  = impedancia por unidad de longitud del conductor en ohmios

Si  $E$  es el voltaje de línea a neutro, expresado en voltios, el porcentaje de caída de voltaje por unidad de longitud será:

$$\% \Delta V (1\phi) = [(2iZ)/(E)]*(100) \quad (2-13)$$

Para un circuito trifásico que sirve la misma carga, se tiene que la caída de voltaje por fase es:

$$\Delta V (3\phi) = IZ \quad (2-14)$$

Donde:

$I$  = corriente por fase de la línea trifásica

Si  $E$  es el voltaje de línea a neutro, expresado en voltios, el porcentaje de caída de voltaje por fase será:

$$\% \Delta V (3\phi) = [(IZ)/(E)]*(100) \quad (2-15)$$

Si se divide la carga servida por el circuito monofásico igualmente entre las tres fases del circuito trifásico, se tiene que la corriente por fase es:

$$I = i / 3$$

Entonces, la razón de caída de voltaje es:

$$\begin{aligned} \frac{\% \Delta V (1\phi)}{\% \Delta V (3\phi)} &= \frac{[(2iZ)/(E)]*(100)}{[(IZ)/(E)]*(100)} \\ &= (2i) / (I) = (2i) / (i/3) = 6 \end{aligned}$$

Se puede observar que la caída de voltaje por fase en la línea trifásica se redujo a la sexta parte del valor de la caída de voltaje que se da en un sistema monofásico. Por lo tanto, el cambio de un sistema monofásico a uno trifásico permite un gran crecimiento de la carga en el área servida por el circuito original.

## 2.8 Elevación del nivel de voltaje primario

Quando se efectúa un cambio del nivel de voltaje de una línea primaria manteniendo la misma carga, la corriente de la línea varía en razón inversa al cambio de

voltaje, lo que se puede observar a través de la siguiente formula:  $I = P / E$ , además, la regulación de voltaje varía con el cuadrado del cambio de voltaje.

Si se cambia de un sistema estrella con cuatro hilos a un sistema delta con tres hilos, es decir, si se incrementa el voltaje en un factor igual a  $\sqrt{3}$ , se reduce la caída de voltaje en la línea en  $1/3$  del valor de caída original.

Este método toma en cuenta factores tales como: crecimiento de la carga, localización de subestaciones, planes de expansión, etc.

### **3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE REGULACIÓN DE VOLTAJE**

#### **3.1 Datos característicos del circuito**

Para poder llevar a cabo el análisis técnico económico entre métodos de regulación de voltaje en un circuito de distribución determinado, es indispensable, además de conocer características técnicas de las líneas y la configuración del circuito, obtener datos de energía eléctrica, los cuales permiten definir de manera adecuada las características de la carga y predecir el efecto que pueden tener en el sistema de distribución.

Para propósitos de este análisis, resulta conveniente explicar los términos que relacionan cantidades eléctricas que ayudan a precisar las características del circuito que se estudia, de una manera sencilla. A continuación se presenta una breve definición de las relaciones más importantes y útiles.

##### **3.1.1 Datos geográficos**

La ubicación geográfica de un circuito ó sistema de distribución particular, nos ayuda a obtener una mejor comprensión de las características del circuito, por ejemplo: las condiciones socioeconómicas de los consumidores en una zona determinada, difiere de las condiciones de los de otras zonas, lo que de alguna u otra manera influirá en la demanda de potencia del circuito.

Por otra parte, en lo que al tendido de líneas se refiere, una determinada zona geográfica puede diferir de otra, en cuanto al tipo de postes o configuración de las fases.

### **3.1.2 Datos de carga**

#### **3.1.2.1 Demanda del circuito**

La demanda de un circuito ó sistema, es la carga en las terminales receptoras tomada en un valor medio en determinado intervalo de tiempo. En ésta definición se entiende por carga la que se mide en términos de potencia (aparente, activa, reactiva) o de intensidad de corriente. El período durante el cual se toma el valor medio se denomina intervalo de demanda, éstos pueden ser del orden de 15, 30, 60 ó más minutos, dependiendo de la aplicación de que se trate.

Al definir la demanda es requisito indispensable indicar el intervalo de demanda, ya que sin esto el valor que se establezca no tiene ningún sentido práctico. por ejemplo: si la carga consiste en un motor de inducción, el valor instantáneo de la corriente de arranque será cinco a seis veces la corriente nominal de plena carga y probablemente muchas veces mayor que la corriente que por lo regular tome el transformador que lo alimente; sin embargo, se sabe que durará un intervalo muy pequeño, usualmente menor que un segundo.

#### **3.1.2.2 Curva de carga**

Una curva de carga (también llamada curva de demanda), es el resultado de plotear en el eje de las ordenas la demanda de potencia y en el eje de las abscisas el tiempo correspondiente. Para un circuito, una curva de carga típica puede representar la demanda del circuito durante un período que puede ser: un día, una semana, un mes, o un año según la aplicación específica que se considere. En la figura 15 se muestra una curva de carga diaria, en la que se puede observar como varía la demanda en un período de 24 horas. En estas curvas el valor más elevado de demanda se denomina pico o demanda máxima del circuito.

### 3.1.2.3 Factor de carga

Para una curva de carga, el factor de carga se define como la relación entre la demanda media en un período dado y la demanda máxima que se observa en el mismo período. En forma matemática se tiene:

$$FC = D_{med} / D_{max} \quad (3-1)$$

Donde:

FC = factor de carga

D<sub>med</sub> = demanda media en el período de la curva de carga

D<sub>max</sub> = valor máximo de la demanda en la curva de carga

La demanda media, en la ecuación (3-1), es la relación que existe entre la energía absorbida en el período de la curva de carga, dividido el tiempo de ese mismo período. Matemáticamente está expresado por:

$$D_{med} = (\text{Energía absorbida en el período } \Delta t) / \Delta t \quad (3-2)$$

donde:

$\Delta t$  = período de duración de la curva de carga

En la ecuación (3-2), la energía absorbida, es el resultado de integrar el área bajo la curva de carga. ó en su defecto, la sumatoria de las demandas de la curva de carga multiplicadas por el período de demanda expresado en horas, para obtener términos de energía (kWh). Si la energía absorbida se expresa en kWh, y  $\Delta t$  en horas, la D<sub>med</sub> vendrá dado en kW y como D<sub>max</sub> tiene las mismas dimensionales que D<sub>med</sub>, entonces, el factor de carga es adimensional.

### 3.1.2.4 Factor de pérdidas

Para un sistema el factor de pérdidas se define como la relación entre el valor medio y el valor máximo de potencia disipada en pérdidas en un intervalo de tiempo dado. Si se representa en forma matemática se tiene:

$$FP = (\text{pérdidas medias durante } \Delta t) / (\text{pérdidas máximas en } \Delta t) = P_m / P_M \quad (3-3)$$



En donde:

$P_m$  = valor medio de potencia activa pérdida durante un intervalo  $\Delta t$

$P_M$  = valor máximo de potencia activa disipada en un intervalo  $\Delta t$

Sin embargo, el cálculo del factor de pérdidas se torna muy difícil, sobre todo cuando el factor de potencia de la carga varía constantemente, por tanto, buscando una relación entre el factor de carga y el factor de pérdidas es posible simplificar los cálculos. Existen diversas fórmulas empíricas para el cálculo aproximado del factor de pérdidas, las cuales pueden producir confusión sobre cual de ellas usar. En un estudio realizado en un total de 84 circuitos de distribución de Empresa Eléctrica de Guatemala S.A. para comparar el grado de diferencia entre varias de las formulas y el método de integración, los resultados indicaron que respecto al método de integración, la formula con menor desviación estándar es la de EBASCO (ver anexo 1 para información respecto a este estudio), esta formula viene dado por:

$$FP = 0.85 FC^2 + 0.15 FC \quad (3-4)$$

Donde:

$FC$  = factor de carga

$FP$  = factor de pérdidas

### 3.1.2.5 Crecimiento de carga

Algo muy importante que se debe considerar en la planeación de un sistema de distribución, es el crecimiento de la carga, por lo general por medio de una tasa anual.

El crecimiento de carga es atribuible a varios factores: nuevos consumidores, aumentos de carga de los consumidores actuales, etc. éstos factores son aplicables a diferentes partes del sistema y en distintos grados, por lo que no es aconsejable una estimación generalizada del crecimiento de carga para todos los casos. Solamente un estudio cuidadoso y continuado de los diferentes factores que afectan el crecimiento de carga, dará datos adecuados, con los cuales se puede estimar el futuro crecimiento de la

carga. Estadísticas y datos detallados del comportamiento pasado del sistema, mes con mes, y año con año, son de gran ayuda en la predicción del futuro comportamiento del sistema.

En general, si se conoce la tasa de crecimiento de la carga, el incremento de ésta en un período de  $t$  años se puede determinar aproximadamente con la siguiente ecuación:

$$L_t = L_i (1 + g)^t \quad (3-5)$$

donde:

$g$  = tasa anual de crecimiento de la demanda

$t$  = número de años

$L_i$  = carga inicial

$L_t$  = carga al final de  $t$  años

### **3.1.3 Datos de las líneas**

En general los parámetros de las líneas (ampacidad, resistencia de secuencia positiva, reactancia de secuencia positiva, etc.) de los circuitos de distribución son de gran importancia en éste tipo de análisis, porque permiten simular y evaluar la operación de los circuitos de distribución. Los valores de las componentes simétricas de la resistencia y reactancia son encontrados en base a valores de: resistencia y reactancia a un pie de espaciamiento, por lo que hay que conocer el tipo de conductor del circuito que se simula, y establecer si se trata de un circuito monofásico, bifásico o trifásico.

## **3.2 Estudio de flujo de carga**

El estudio de flujo de carga es indispensable para evaluar el comportamiento del sistema, y para llevar a cabo el análisis técnico, dado que permite observar, entre otras cosas, las magnitudes de voltaje, intensidades y potencia en varios puntos de la red eléctrica. Actualmente existen varios programas de computadora para hacer los estudios

de flujo de carga, en el desarrollo de este trabajo se usa el paquete de software DPAS (Distribution Primary Analysis System) para hacer el análisis técnico.

De los resultados obtenidos del programa DPAS, son de interés dos factores: a) las pérdidas de potencia del circuito y b) el perfil de voltaje. El primero es indispensable para poder encontrar el beneficio del ahorro de pérdidas y, el segundo, porque presenta una información completa de la magnitud del voltaje que hay en cada uno de los nodos de un circuito a lo largo de su trayectoria.

La simulación del circuito de distribución enfocado a estudios de regulación de voltaje se hace de dos maneras: a) condiciones actuales y b) con equipo de regulación instalado. En el primer caso, se entiende por condiciones actuales, la simulación del circuito de distribución sin ningún equipo o método de regulación instalado, y el segundo caso, se refiere a la simulación del circuito con cada una de las opciones o métodos de regulación de voltaje con que se cuenta para mejorar el perfil de voltaje.

### **3.3 Criterios de evaluación para selección de métodos de regulación**

Cada una de las opciones o métodos de regulación que sean factibles de implementar para disminuir la caída de voltaje, deben ser evaluadas para seleccionar la mejor. Se entenderá por mejor aquella opción que:

- a. Aumente el voltaje por encima del nivel mínimo permisible en todos los puntos donde esté debajo de ese nivel, en condiciones de carga máxima y no lo incremente por encima del voltaje máximo permisible en condiciones de mínima carga.
- b. No cause ningún efecto secundario perjudicial.
- c. Tenga el menor costo.
- d. Su efecto sea por más tiempo.
- e. Cause máximos efectos secundarios benéficos.

Los aspectos indicados en los incisos "a" y "b" son indispensables, de ahí que la opción que no los logre totalmente, debe ser eliminada. Mientras que los incisos "c", "d" y "e" son aspectos que permiten hacer una evaluación económica, tal como la relación beneficio/costo para un período igual a su tiempo de efectividad; es decir, el tiempo en que la opción sea suficiente, ó el tiempo en que tarde en saturarse.

### **3.4 Indicadores de evaluación**

El cumplimiento del inciso "a" implica que el voltaje que se tendría con la opción, en cada punto sería mayor que el voltaje mínimo permisible, en condiciones de máxima carga. Además, en ningún punto del circuito debiera de causar un voltaje mayor al máximo permisible en condiciones de mínima carga.

Las opciones que satisfagan esta condición, se evaluarán económicamente mediante la relación "beneficio/costo", expresada en valores presentes, para un período igual al tiempo efectivo de funcionamiento de la opción correspondiente.

#### **3.4.1 Tiempo de vida de la opción**

El tiempo de vida de la opción ó el tiempo de efectividad, es el tiempo de duración del voltaje dentro del rango permisible aceptado por las normas (ver inciso 3.5).

El crecimiento de la demanda de energía eléctrica, implica un crecimiento de la corriente eléctrica, con lo cual también se incrementa la caída de voltaje en el circuito, por lo tanto, el haber logrado por cualquier método de regulación que el voltaje esté dentro del rango permisible, solamente durará un tiempo.

El cálculo del tiempo de efectividad ( $t_e$ ), parte de que la caída de voltaje  $\Delta V$  crece con el tiempo con el factor  $(1 + g)^{t_e}$ , que es el mismo con el que crece la corriente y la demanda.

En el año  $t_e$ , en el punto crítico el voltaje  $V_t$  viene dado por:

$$V_t = V_m - \Delta V_o(1 + g)^{t_e} \quad (3-6)$$

donde:

$V_m$  = voltaje máximo permisible

$g$  = tasa de crecimiento de la carga

$\Delta V_o$  = caída de voltaje en el punto crítico en el año inicial con el método de regulación, y medido con relación al voltaje  $V_m$ .

Matemáticamente  $\Delta V_o$  ésta expresado por:

$$\Delta V_o = V_m - V_o \quad (3-7)$$

donde:

$V_o$  = voltaje en el punto crítico al inicio de la solución ( $V_t < V_o < V_m$ )

Sustituyendo la ecuación (3-7) en (3-6) y resolviendo para  $t_e$ , se tiene:

$$t_e = \{ \ln [(V_m - V_t)/(V_m - V_o)] \} / [\ln (1 + g)] \quad (3-8)$$

donde:

$\ln$  = logaritmo natural

### 3.4.2 Evaluación de los beneficios

Los beneficios que se obtienen de cada una de las opciones que se evalúan, vienen dados por el costo del ahorro de pérdidas de potencia. El ahorro de pérdidas de potencia, será igual a la diferencia que existe entre las pérdidas de potencia dadas sin emplear ningún método de regulación (condiciones actuales del circuito), menos las pérdidas de potencia que existen al emplear un método de regulación. Estos valores se obtienen del sumario del flujo de carga. El tiempo durante el cual se evalúan los beneficios es igual al tiempo de efectividad de la opción.

En este punto es importante recordar que la energía eléctrica es un producto que sin importar la distancia entre el lugar de producción y el de consumo, se produce en el preciso momento de su utilización, es decir, no puede ser almacenada y se proporciona

en la medida exacta que la demanda el consumidor. Estas características obligan a que la compañía suministradora de energía eléctrica venda dos productos a los usuarios:

- La energía que consume en un período dado.
- La rapidez con que debe ser suministrada la energía que requiere en el momento y en la medida que lo necesite.

Por lo anterior las tarifas eléctricas están compuestas por dos conceptos:

- El costo de la energía (Q/kWh).
- El cargo por demanda (Q/kW).

Se puede decir entonces que las pérdidas en un sistema eléctrico, son tanto de energía como de demanda y ambos tipos de pérdidas tienen un costo económico para las empresas. La evaluación del costo de pérdidas no es sencilla, dentro del análisis económico de una red de distribución, es éste uno de los más difíciles de determinar debido a la complejidad del sistema; existen varios métodos para su cálculo, las cuales dependen fundamentalmente de las políticas económicas de cada empresa.

En el caso de conductores, las pérdidas son proporcionales al cuadrado de la corriente, por lo que para calcular las pérdidas de energía en un periodo de tiempo dado, es necesario multiplicar las pérdidas de demanda máxima por el número de horas en el período y por el factor de pérdidas en el período. Si a las pérdidas de energía se suma el valor de pérdidas de demanda, se obtiene el valor de pérdidas totales. Considerando un período de evaluación de 1 año se obtiene:

$$CAP = (P_{Dmax} \cdot C_p) + (P_{Dmax} \cdot C_e \cdot FP(8760)) \quad (3-9)$$

donde:

CAP = costo anual de pérdidas

$P_{Dmax}$  = pérdidas de demanda máxima en kW

$C_p$  = costo anual del kilovatio de pérdidas (Q/kW-año)

$C_e$  = costo de energía (Q/kWh)

FP = factor de pérdidas

Para encontrar el valor presente de las pérdidas durante un período de t años, considerando el crecimiento de la carga y despreciando la tasa de crecimiento de la longitud del circuito, se obtiene:

$$VPP = [(PD_{max}.C_p) + (PD_{max}.C_e.FP(8760))] \sum_{t=1}^n \frac{(1+g)^{2t}}{(1+i)^t} \quad (3-10)$$

donde:

g = tasa anual de crecimiento de la demanda

i = tasa de interés

t = tiempo del horizonte de estudio (tiempo de efectividad de la opción)

La ecuación (3-10) puede expresarse también sustituyendo la sumatoria por una integración, la cual al resolverla da:

$$VPP = [(PD_{max}.C_p) + (PD_{max}.C_e.FP(8760))] \frac{[(1+g)^{2t}(1+i)^{-t} - 1]}{[2.\ln(1+g) - \ln(1+i)]} \quad (3-11)$$

La ecuación (3-11) es la que se usa para llevar a cabo la evaluación del costo de ahorro de pérdidas en cada una de las opciones viables de métodos de regulación de voltaje, por tanto, en ésta ecuación PD<sub>max</sub> es igual a la diferencia entre PD<sub>max</sub> sin emplear ningún método de regulación, menos PD<sub>max</sub> al emplear uno de los métodos de regulación.

### 3.4.3 Evaluación del costo de inversión

En esta evaluación se incluyen todos los costos que se necesitarán en cada una de las alternativas de regulación a lo largo del tiempo de efectividad. Todas las inversiones efectuadas se pasan a un valor presente para poder llevar a cabo la evaluación económica. El valor presente de las inversiones que ocurren en años futuros, se encuentra mediante la siguiente expresión:

$$P = F [ 1 / (1 + i)^n ] \quad (3-12)$$

donde:

P = valor presente del dinero

F = valor del dinero al final de n años

i = tasa de interés

Por otra parte, si las inversiones ocurren en valores uniformes año con año, el valor presente de éstas cantidades viene dado por:

$$P = A \left\{ \frac{[(1+i)^n - 1]}{i(1+i)^n} \right\} \quad (3-13)$$

donde:

A = valor uniforme de la inversión cada año

i = tasa de interés

n = número de años en que ocurren las inversiones uniformes

P = valor presente de la inversión

Para determinar el valor presente total de las inversiones se toman en consideración todos los recursos materiales y mano de obra necesarias para la realización, éstos deben comprender cuando menos los siguientes:

- Costo de materiales y equipos.
- Transporte.
- Costo de mano de obra.
- Costo de operación y mantenimiento.

La composición de todos estos costos constituirá el total estimado de la inversión, de la cual se deberá restar, si éste es el caso, el valor de rescate del equipo existente, obteniéndose así la inversión real que debe considerarse en el análisis económico. Por otra parte, “cuando el costo de operación y mantenimiento de todas las alternativas es similar, es aconsejable eliminarlo del costo total” (ESPINOSA, 1990; p. 278).

### **3.5 Análisis técnico**

Es fundamental que todas las alternativas formuladas para la regulación de voltaje contemplen los requisitos de calidad del servicio, es aquí donde las alternativas que no



sean técnicamente viables son eliminadas. Un análisis técnico completo de un circuito de distribución consiste fundamentalmente en el cálculo de la regulación de voltaje, confiabilidad, protección, carga de los conductores y equipo en general, por medio de la simulación de las condiciones operativas del sistema de distribución previsto en cada alternativa, considerando las condiciones actuales y futuras, año con año.

Para propósitos de este trabajo se hace un análisis técnico de regulación de voltaje, con la curva de perfil de voltaje que se obtiene de cada una de las simulaciones, se observa si ésta se encuentra entre los márgenes dados por las normas, si la curva del perfil de voltaje se sale de éstos márgenes, entonces se trata de una solución técnicamente no aceptable. El análisis se efectúa de acuerdo a los valores de voltaje aceptados por las normas ANSI (114 voltios para la magnitud de voltaje mínimo permisible y 126 voltios para la magnitud de voltaje máximo permisible), y no se lleva a cabo con los valores de voltaje dictados en la tabla I, dado que al momento de efectuar la primera corrida del programa, estos valores no estaban publicados oficialmente.

### **3.6 Análisis económico**

Como se mencionó anteriormente los métodos de regulación de voltaje que son técnicamente viables serán los que se evaluarán económicamente, la evaluación viene dada por la relación "Beneficio/costo". El análisis beneficio-costo "se emplea para asegurarse de que el proyecto se ejecute en el tiempo y en la forma que produzca la razón más alta de beneficio con respecto al costo, para obtener beneficios financieros más altos, y lograr el valor actual neto más elevado" (AHUJA, 1989; p. 32).

La mecánica de las comparaciones beneficio-costo son directas y sencillas, hasta un extremo engañoso, ya que: "una relación beneficio-costo incluye el costo y el beneficio de un proyecto en particular, pero no brinda indicación alguna sobre lo valioso que es el beneficio en comparación con otros proyectos o la cantidad relativa de recursos

involucrados” (RIGGS, 1990; p. 471). Las fórmulas básicas de comparación son las siguientes:

$$B/C = \text{valor presente de los beneficios/valor presente de los costos} \quad (3-14)$$

$$B/C = \text{beneficios anuales equivalentes/costos anuales equivalentes} \quad (3-15)$$

$$\text{Valor anual del beneficio neto}(B-C) = \text{VP(beneficios)} - \text{VP(costos)} \quad (3-16)$$

La medida básica de aceptabilidad de la relación beneficio/costo es un valor mayor que la unidad, ó en forma equivalente, una diferencia neta positiva entre el beneficio y el costo. La relación  $B/C > 1$  constituye un estándar de aprobación mínima, pero no es un criterio efectivo de calificación.

Los costos y beneficios de las diferentes alternativas se descuentan a la misma tasa de interés. La tasa adecuada de interés a utilizar en la evaluación de las inversiones públicas constituye un problema ampliamente debatido. Aun cuando se han ofrecido muchas sugerencias, ninguna de ellas ha recibido una aceptación total. Los proyectos sociales son particularmente sensibles a la tasa de descuento aplicada, por razón de que la mayor parte de los grandes gastos se producen al principio, en tanto que los beneficios se extienden durante el futuro; así, una tasa elevada de descuento tiende a producir la proporción relativa del beneficio al costo.

Para propósitos de este trabajo se usa una tasa de interés de 12%, la cual está actualmente (en nuestro medio), por encima de la tasa de inflación y de la tasa de interés pasiva de los bancos del sistema. Por otra parte, es la fórmula (3-14) la que se utiliza para hacer la evaluación beneficio/costo.

### **3.7 Selección de la mejor opción**

El método de regulación de voltaje, o la opción que será seleccionada como la mejor será aquella que presente mayor magnitud numérica de la relación beneficio/costo.

## 4. APLICACIÓN

### 4.1 Características del circuito

El circuito de distribución rural que sirve para llevar a cabo el análisis técnico económico entre los diferentes métodos de regulación de voltaje, es el circuito 83 de la subestación Amatitlán, propiedad de Empresa Eléctrica de Guatemala S.A.. Las características que identifican a éste circuito se detallan a continuación.

#### 4.1.1 Datos geográficos

La subestación Amatitlán está ubicada en la calle real al lago, lote 0-135, Amatitlán municipio de Guatemala. Actualmente, alimenta 3 circuitos, estos son: el 81, 82 y 83.

Amatitlán, Santa Elena Barillas, Palín Escuintla, etc. son entre otras, ciudades importantes por donde pasan las líneas energizadas por la subestación Amatitlán. Una gran parte del territorio que cubre el circuito 83 es rural, algunas de las aldeas que alimenta son: Las Trojes, Los Ríos, El Patrocinio, El Cedro, etc. la primera de ellas pertenece al municipio de Amatitlán y las últimas tres al municipio de San Vicente Pacaya. Un gran número de fincas: La Joya, Los Jazmines, Sacramento, Esmeralda, Carmela, Villa Laura, etc. también reciben la energía eléctrica de éste circuito; sin embargo, como se menciona al inicio del capítulo 1, un circuito no solamente alimenta áreas rurales, tal es el caso del circuito 83 que también electrifica algunas ciudades.

La configuración del circuito 83 es radial, tal como se observa en la figura 14, donde se muestra el diagrama unifilar del circuito con la ubicación geográfica de las líneas de distribución primaria y de algunos de los nodos.

#### 4.1.2 Datos de carga

La subestación Amatitlán está alimentada por una línea de 69 kV, que parte de la planta Laguna ubicada también en Amatitlán, tiene un transformador de potencia marca Siemens de 15/28 MVA de capacidad, conectado en Delta-Estrella aterrizada, que reduce el voltaje a 13.8 kV.

El valor de demanda máxima del circuito 83, es en promedio 5.43 MVA, y para el transformador de la subestación 17.2 MVA. La figura 15 muestra una curva de carga diaria del circuito 83, en la cual se puede observar como varía la demanda en un período de 24 horas.

Partiendo de los datos de curva de carga de la figura 15 (los datos de carga no se muestran en la gráfica), y evaluando la ecuación (3-1) se encuentra el factor de carga que corresponde a éste circuito ( $FC = 0.722$ ), además, si se conoce el factor de carga, es posible encontrar a través de la ecuación (3-4) el valor que corresponde al factor de pérdidas ( $FP = 0.55$ ).

Por otra parte, según estudio de densidades de carga (estudio que parte de datos históricos de carga de los circuitos) realizado por el departamento de Ingeniería y Desarrollo de Empresa Eléctrica de Guatemala S.A., la tasa anual de crecimiento de la demanda para el circuito 83 es de 10%.

Figura 14. Diagrama unifilar de ubicación geográfica de las líneas de distribución primaria del circuito 83

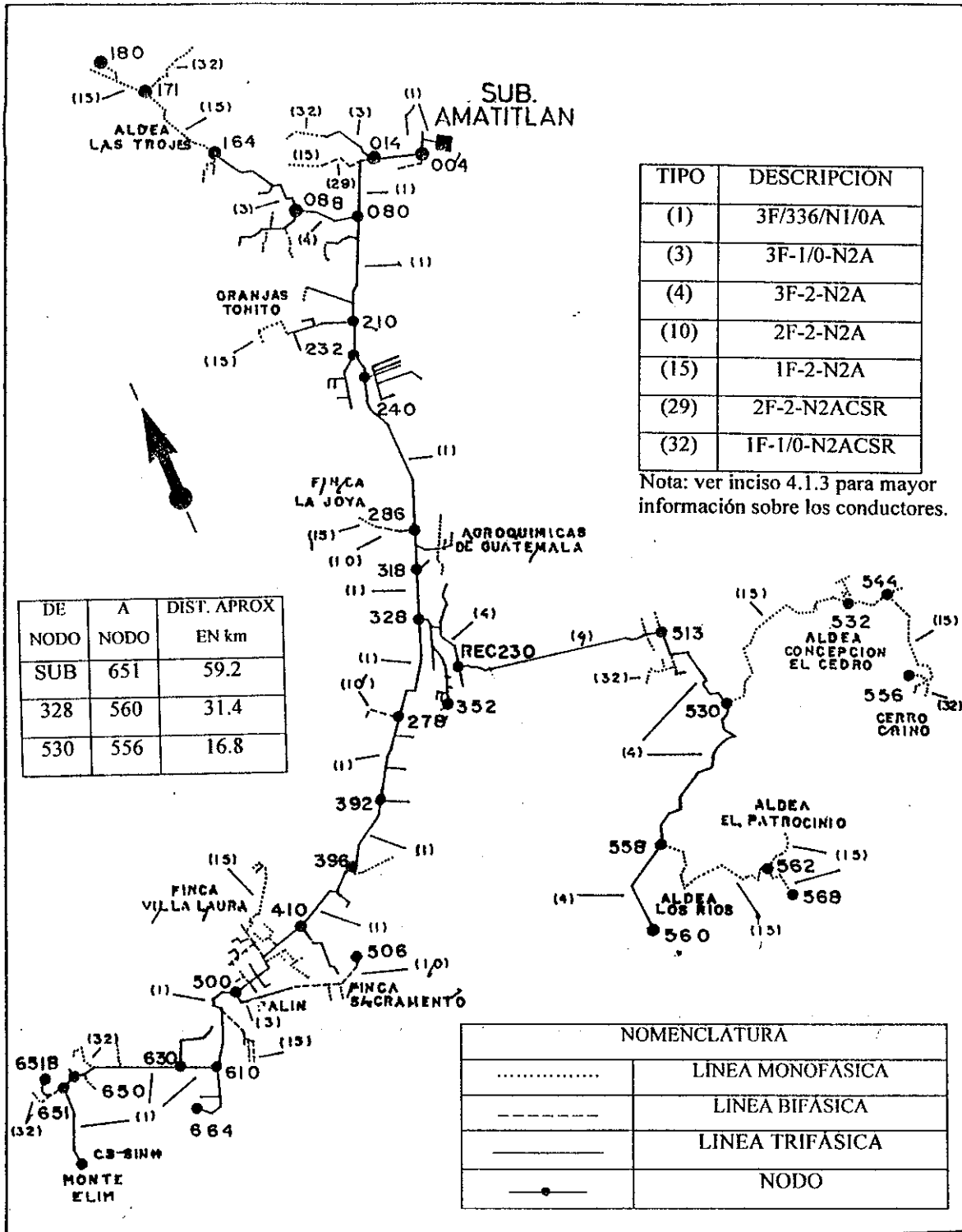
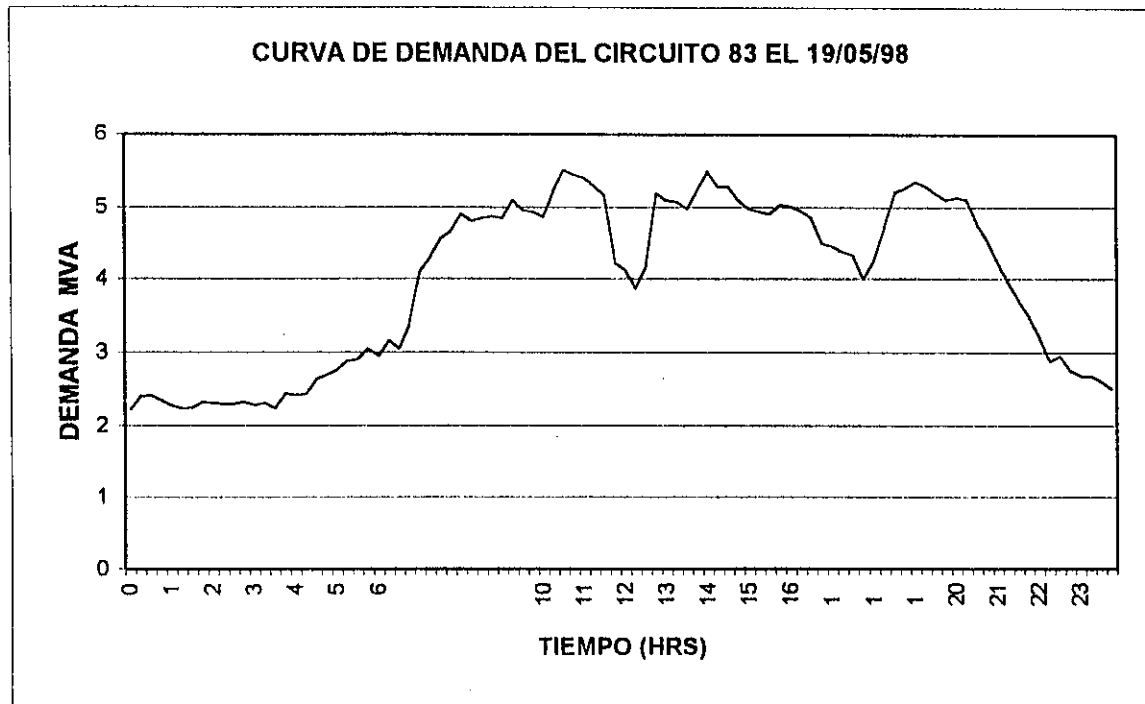


Figura 15. Curva de demanda horaria diaria del circuito 83



#### 4.1.3 Datos de las líneas

Los conductores que forman el circuito de distribución primaria, están alimentados a una tensión de 13.8 kV fase a fase, y como se puede observar en la figura 14 son varios los calibres de los conductores utilizados. Los parámetros de las líneas necesarios para formar la base de datos del programa DPAS son los que se muestran en la tabla V, como se puede observar, la descripción de los conductores es la misma que la presentada en la figura 14.

Los datos mostrados en la tabla V, se obtienen del programa DPAS, a partir de los valores de resistencia y reactancia a 1 pie de espaciamiento, los cuales se encuentran en tablas de especificaciones de los fabricantes. Además de éstos datos, es necesario conocer: la distancia entre conductores, la frecuencia del sistema (60 Hz) y la resistencia a tierra (valor típico 100  $\Omega$ -m).

Tabla V. Parámetros de las líneas del circuito 83

TIPO	DESCRIPCIÓN	AMPACIDAD	IMPEDANCIAS (OHMS/KM)			
			R(+)	X(+)	R(0)	X(0)
(1)	3F/336/N1/0A	381	0.1901	0.3903	0.5594	1.383
(3)	3F-1/0-N2A	180	0.6959	0.5177	1.107	1.616
(4)	3F-2-N2A	135	0.9900	0.5070	1.436	1.607
(10)	2F-2-N2A	135	1.1100	0.8899	1.432	1.532
(13)	2F-6-N6C	94	1.5160	0.5546	1.921	1.650
(15)	1F-2-N2A	135	1.1100	0.8899	1.448	1.552
(17)	1F-6-N6C	94	1.5160	0.5353	1.936	1.676
(29)	2F-2-N2ACSR	138	1.0500	0.5745	1.454	1.532
(32)	1F-1/0-N2ACSR	210	0.6953	0.6487	0.8736	2.066
(33)	2F-1/0-N2ACSR	210	0.6953	0.6487	0.8736	2.066

Por otra parte, la descripción de los tipos de conductores mostrada en la tabla V, se refiere al número de fases, y calibre de los conductores, por ejemplo: el tipo (3) se trata de una línea trifásica, de conductor calibre 1/0 para las fases, y calibre 2 de aluminio para el conductor neutro.

#### 4.2 Condiciones iniciales del circuito

El circuito en condiciones iniciales no tiene instalado ningún equipo de regulación de voltaje, por lo tanto se corre el programa bajo estas condiciones con el fin de observar el perfil de voltaje. El sumario del flujo de carga que resulta de esta corrida se presenta en la tabla VI, aquí se puede ver la magnitud del voltaje máximo y mínimo, el nodo en que ocurren estos voltajes, y las pérdidas de potencia entre otros. El reporte completo del flujo de carga es bastante extenso, por lo tanto no se presenta, únicamente se toman lecturas de los valores de voltaje en los nodos, con los cuales se plotea el gráfico de la figura 16, donde se observa que a partir del nodo 240 (distancia aproximada del nodo a la subestación es 14.9 km) la magnitud del voltaje está por debajo de 114 voltios.

Para éste y todos los casos de simulación que se efectúan, se hace una conversión de las magnitudes de los voltajes que se obtienen de los reportes de salida, del reporte de las condiciones iniciales del circuito se toma el voltaje de 100.8% igual a 120 voltios, esto con el fin de poder visualizar mejor en las gráficas el comportamiento del voltaje respecto a los valores máximo y mínimo permitidos por las normas.

Tabla VI. Resumen del flujo de carga que se obtiene de las condiciones iniciales del circuito

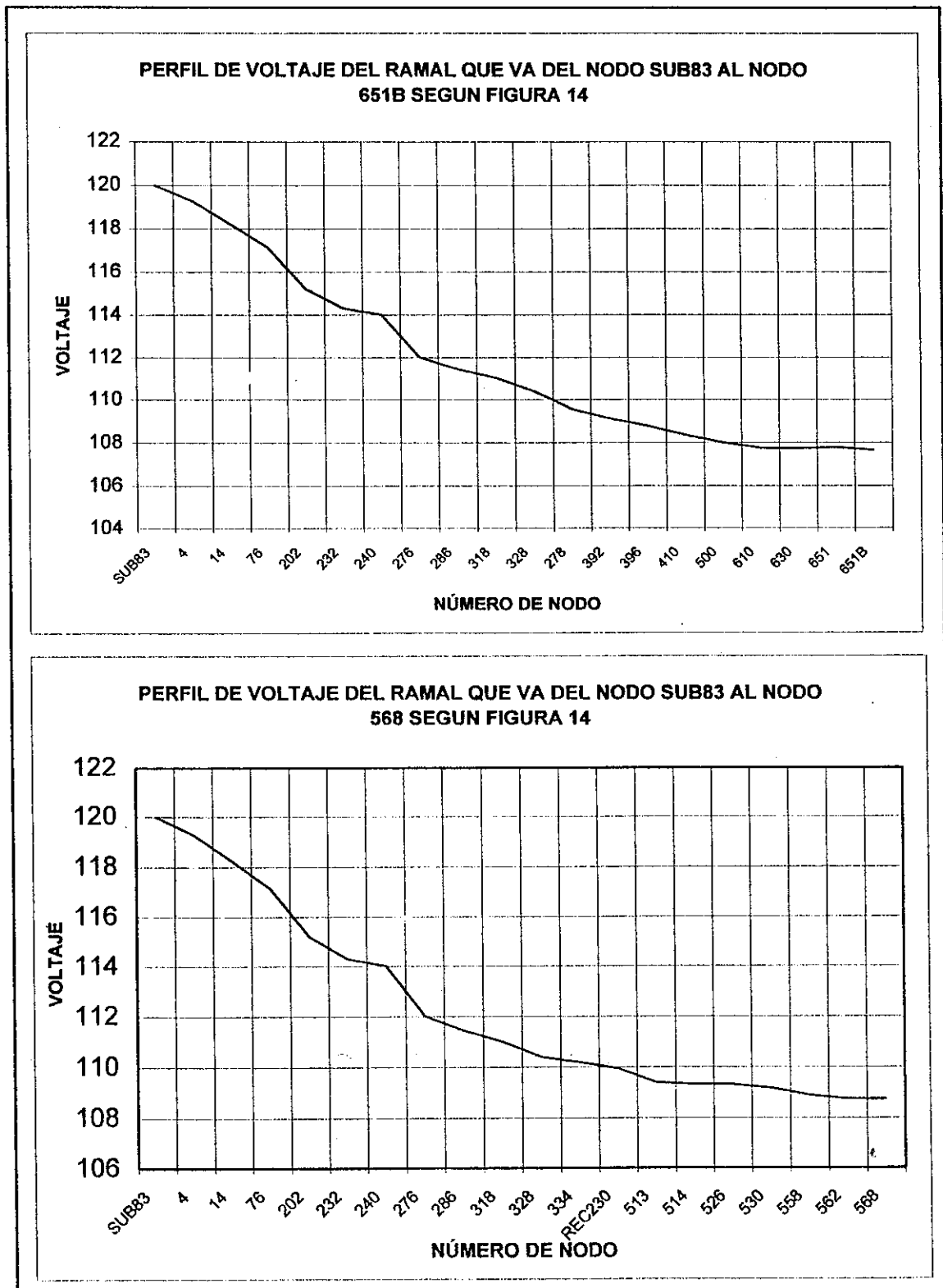
18-05-98	EMPRESA ELÉCTRICA DE GUATEMALA, S.A. DATA BASE- C:\DATA\CIRCTO83 CONDICIONES INICIALES SIN EQUIPO DE REGULACIÓN							
	LOAD FLOW ANALYSIS SUMMARY							
Start Node= SUB83	Nominal L-N Source Voltage = 7.62 kV Convergence reached in 3 iteraciones							
	Ckt.kVA	Ckt.kW	Ckt.kVAr	SRC.PF%	LD.PF%	Amps	kW Loss	kVAr Loss
A-Phase	1989.	1713.	1010.	86.13	88.11	258.9	62.28	124.6
B-Phase	1963.	1684.	1008.	85.78	88.04	255.5	61.68	122.4
C-Phase	1815.	1532.	973.9	84.39	85.83	236.4	48.76	97.64
Neutral						21.91	.6771	1.815
Total	5767.	4930.	2993.	85.47	87.38		173.4	346.5
	Max% Ampac.	From	To	Conductor Type	Min% Volt.	At Node	Max% Volt	At Node
A-Phase	67.97	SUB83	REG83	3F/336/N1/0A	90.43	651B	100.8	SUB83
B-Phase	67.07	SUB83	REG83	3F/336/N1/0A	92.10	556	100.8	SUB83
C-Phase	62.04	SUB83	REG83	3F/336/N1/0A	93.42	664	100.8	SUB83

### 4.3 Selección de métodos de regulación de voltaje

Como se menciona en el capítulo 2, no todos los métodos de regulación de voltaje listados en la tabla IV son factibles de implementar en sistemas eléctricos de distribución rural, los métodos que no son evaluados técnicamente y por tanto tampoco económicamente, se justifican a continuación.



Figura 16. Perfil de voltaje de las condiciones iniciales del circuito



El mecanismo cambiador de derivación bajo carga (LTC), si bien es cierto mantiene un voltaje nominal de salida constante, la caída de voltaje a lo largo del circuito permanecerá igual. Por tanto se tendrá una curva de perfil de voltaje similar al de las condiciones iniciales del circuito, lo que hace suficiente la justificación por lo cual éste método de regulación no será evaluado.

El balance de carga en líneas primarias es otro de los métodos de regulación que no será evaluado, ya que si se observa en el resumen del flujo de carga que se muestra en la tabla VI, las corrientes en cada una de las fases presentan valores muy parejos, por lo que se puede considerar que se trata de un sistema bastante balanceado; por otra parte, en la práctica es casi imposible tener un sistema totalmente balanceado debido al crecimiento constante de las cargas, y más aún en el área rural, donde las cargas generalmente son monofásicas.

Otro método de regulación de voltaje que no será evaluado, es el que se refiere a transferencia de cargas a nuevas líneas, generalmente éste método es usado cuando un circuito se encuentra demasiado sobrecargado, y el calibre de los conductores ya no es suficiente, además, si no existe otro circuito al cual se le puede transferir carga, esto implica la construcción de uno nuevo, el cual tendrá un costo bastante elevado.

La elevación del nivel de voltaje primario, es un método de regulación que implica una inversión de dinero demasiado grande, en primer lugar porque es necesario cambiar el transformador de la subestación para obtener la relación de voltaje adecuada. Por otra parte, un nivel de voltaje más alto implica una variación en las libranzas de los conductores, por tanto, la necesidad de un cambio de estructuras. Además, sería necesario cambiar todos los bancos de transformadores de distribución. El costo de éste último, más el costo del cambio de estructuras, y el costo del transformador de la subestación, da una idea del costo que tendría implementar esta opción.

Si se observa detenidamente la figura 14, se ve que los ramales monofásicos más largos son lo que van del nodo 530 al 553, y del nodo 558 al nodo 568, según el perfil de voltaje de las condiciones iniciales del circuito (figura 16), se observa que en el nodo 530 y en el nodo 558, el nivel de voltaje está por debajo del voltaje mínimo permisible, por tanto, si se cambiara a trifásico los dos ramales mencionados arriba, la caída de voltaje a lo largo de los ramales será menor; sin embargo, seguirá estando abajo del valor mínimo de voltaje aceptado por las normas, todo esto implicaría una inversión de dinero en vano. Esta es la razón por la cual, el método de cambio de líneas de monofásico a trifásico no será evaluado.

En resumen los métodos de regulación que se evalúan técnicamente son:

1. Instalación de reguladores de voltaje tipo subestación.
2. Instalación de reguladores de voltaje de línea.
3. Incremento de la sección del conductor (cambio de conductores).
4. Instalación de capacitores en la subestación de distribución.
5. Instalación de capacitores en derivación a las líneas.

#### **4.4 Análisis técnico económico de los métodos de regulación seleccionados**

Para hacer la evaluación económica, en general, son utilizados los siguientes valores:

$$C_p = 1456.07 \text{ Q/kW-año}$$

$$C_e = 0.3948 \text{ Q/kWh}$$

$$FP = 0.55$$

$$g = 10\%$$

$$i = 12\%$$

$$V_m = 126 \text{ voltios}$$

$$V_t = 114 \text{ voltios}$$

#### 4.4.1 Análisis con el regulador tipo subestación

##### a) Análisis técnico

En esta fase del trabajo se simula la instalación de un regulador de voltaje en la subestación de distribución. La simulación se efectúa con un regulador de 250 kVA, el cual es capaz de soportar una corriente de 328 amperios (250 kVA es una medida estándar de la capacidad de un regulador), si se observa el sumario del flujo de carga de las condiciones iniciales del circuito (tabla VI) se ve que 258.9 amperios es la magnitud de la corriente máxima que pasará por el devanado serie de regulador, por lo que un regulador de 250 kVA es adecuado para esta solución.

Los parámetros de entrada para simular la instalación del regulador son:

Descripción = JFR-SIEMENS

Número de fases = 3

Ampacidad = 328

% de regulación = 10 %

V-set = 126

LDC voltios reactivos = 0

LDC voltios reales = 0

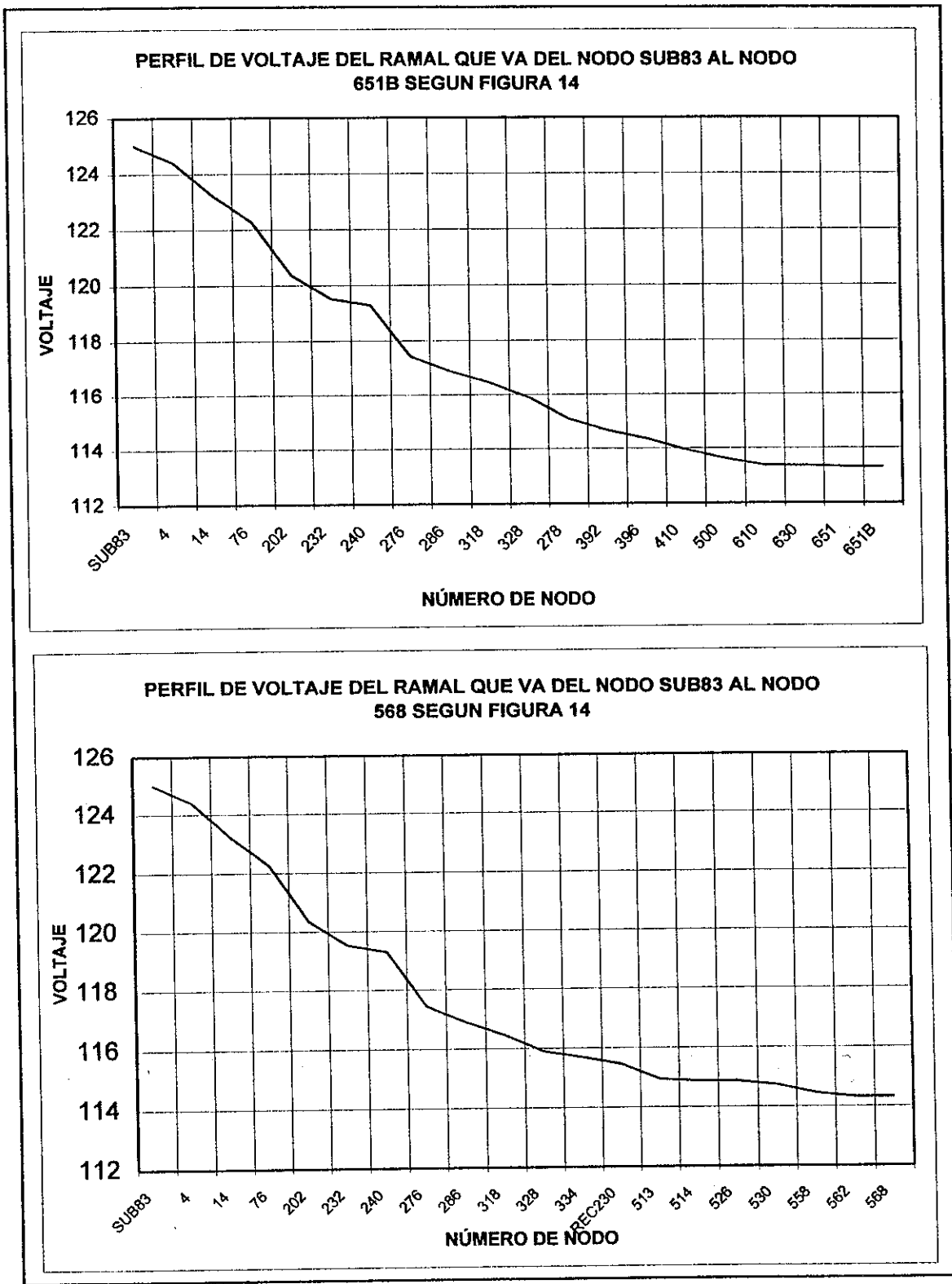
En este caso el nivel de voltaje deseado se ajusto al máximo valor aceptable, según las normas de calidad del servicio, esto con el propósito de obtener una máxima regulación a lo largo de toda la trayectoria del circuito. Bajo estas condiciones se corre el programa, en la tabla VII se presenta el sumario del flujo de carga que resulta de esta simulación, en el cual se puede observar ligeras variaciones respecto a los datos de salida de las condiciones iniciales del circuito.

Tabla VII. Resumen del flujo de carga que se obtiene al instalar el regulador tipo subestación

18-05-98	EMPRESA ELÉCTRICA DE GUATEMALA, S.A. DATA BASE- C:\DATA\CIRC\CTO83 REGULADOR INSTALADO EN LA SUBESTACIÓN							
	LOAD FLOW ANALYSIS SUMMARY							
Start Node= SUB83	Nominal L-N Source Voltage = 7.62 kV Convergence reached in 2 iteraciones							
	Ckt.kVA	Ckt.kW	Ckt.kVAr	SRC.PF%	LD.PF%	Amps	kW Loss	kVAr Loss
A-Phase	1976.	1706.	997.5	86.33	88.11	257.3	56.40	112.9
B-Phase	1952.	1679.	996.0	86.01	88.04	254.2	56.04	111.2
C-Phase	1808.	1528.	966.3	84.51	85.83	235.4	44.41	88.91
Neutral						21.64	.6060	1.624
Total	5737.	4914.	2960.	85.66	87.38		157.4	314.7
	Max% Ampac.	From	To	Conductor Type	Min% Volt.	At Node	Max% Volt	At Node
A-Phase	78.45	SUB83	REG83	JFR-SIEMENS	95.16	651B	105	REG83
B-Phase	77.51	SUB83	REG83	JFR-SIEMENS	96.73	556	105	REG83
C-Phase	71.77	SUB83	REG83	JFR-SIEMENS	97.95	664	105	REG83

El gráfico que se muestra en la figura 17 representa el perfil de voltaje que se obtiene con esta opción de regulación, en el cual se puede observar que a partir del nodo 410 (distancia aproximada entre la subestación y el nodo 410 es 46.03 kms., ver fig. 14) la magnitud del voltaje es menor que la magnitud del voltaje mínimo aceptado por las normas, por tanto, no es necesario hacer el análisis económico para esta opción de regulación.

Figura 17. Perfil de voltaje al instalar el regulador tipo subestación



#### 4.4.2 Análisis con el regulador de voltaje de línea

##### a) Análisis técnico

Observando el perfil de voltaje que resulta de las condiciones iniciales del circuito (figura 16), se encuentra el punto adecuado para la instalación del regulador de voltaje. El concepto de tiempo de efectividad de la opción, conlleva a pensar que el regulador de voltaje no se debe colocar en el punto donde el voltaje alcance el límite mínimo permisible, porque si bien es cierto que el regulador eleva el voltaje en los nodos ubicados en la parte posterior a él, no lo hace en la parte anterior (aquí se entiende por parte anterior, todos los nodos ubicados entre la subestación y el regulador), y entonces, en poco tiempo se presentará de nuevo el problema de regulación cuando haya incremento de carga en la parte anterior al regulador. Por tanto, una forma de escoger el punto de colocación del regulador es que tanto el voltaje previo a la entrada del regulador, tenga un valor cercano o igual al voltaje en el punto crítico del circuito.

Por el método de prueba y error se encuentra que el punto adecuado para la ubicación del regulador es el nodo 080, del reporte de flujo de carga de las condiciones iniciales del circuito se ve que en el nodo 080 pasa una corriente de 203.5 A, por lo que, según la ecuación (2-10) la capacidad del regulador a instalar debe ser por lo menos de 162.1 kVA. Sin embargo, el regulador disponible en nuestro medio es un regulador de 32 pasos de 167 kVA de capacidad, para una corriente de 219 amperios.

Después de ingresar los parámetros para la simulación adecuada del regulador, se efectúa la correspondiente corrida del programa, la tabla VIII nos muestra el reporte del sumario del flujo de carga que resulta de estas condiciones. Del reporte de salida se encuentra que la magnitud de voltaje mas bajo ( $V_0$ ) anterior al punto de colocación del regulador, se da en el nodo 080, el cual tiene un valor de 116.90 voltios. El perfil de voltaje que se obtiene con este método de regulación se muestra en el gráfico de la

figura 18, en el cual se puede ver que éste método de regulación de voltaje sí cumple con las características técnicas, por lo que es necesario hacer la evaluación económica.

Tabla VIII. Resumen del flujo de carga al instalar un regulador de voltaje de línea

18-05-98	EMPRESA ELÉCTRICA DE GUATEMALA, S.A. DATA BASE- C:\DATA\CIR\CTO83 INSTALACIÓN DEL REGULADOR DE LÍNEA EN SEG. 080-186							
	LOAD FLOW ANALYSIS SUMMARY							
Start Node= SUB83	Nominal L-N Source Voltage = 7.62 kV Convergence reached in 2 iteraciones							
	Ckt.kVA	Ckt.kW	Ckt.kVAr	SRC.PF%	LD.PF%	Amps	kW Loss	kVAr Loss
A-Phase	1977.	1706.	999.4	86.28	88.07	257.8	56.30	112.8
B-Phase	1954.	1680.	998.8	85.96	87.99	254.8	56.20	111.8
C-Phase	1811.	1528.	971.4	84.40	85.74	235.8	44.88	89.99
Neutral						21.49	.5616	1.496
Total	5742.	4915.	2969.	85.59	87.38		157.9	316.2
	Max% Ampac.	From	To	Conductor Type	Min% Volt.	At Node	Max% Volt	At Node
A-Phase	67.57	SUB83	REG83	3F/336/1N	97.90	651B	105	186
B-Phase	66.79	SUB83	REG83	3F/336/1N	98.26	156	105	186
C-Phase	61.89	SUB83	REG83	3F/336/1N	98.09	182	105	186

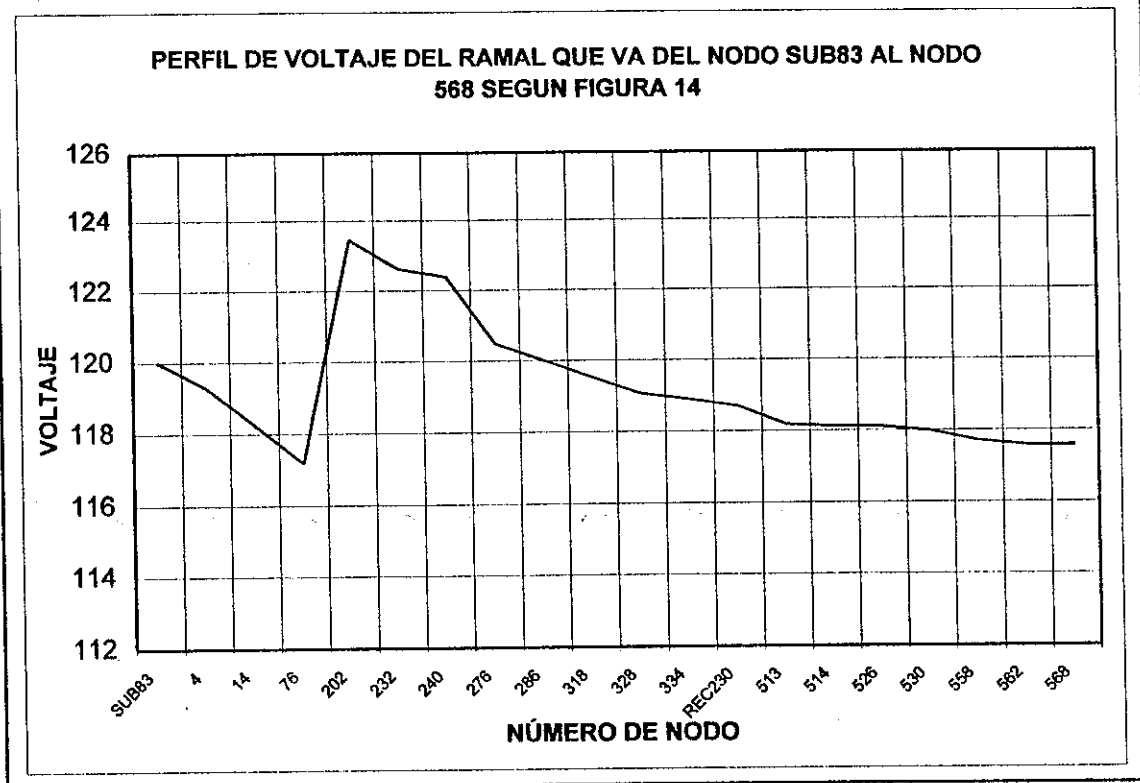
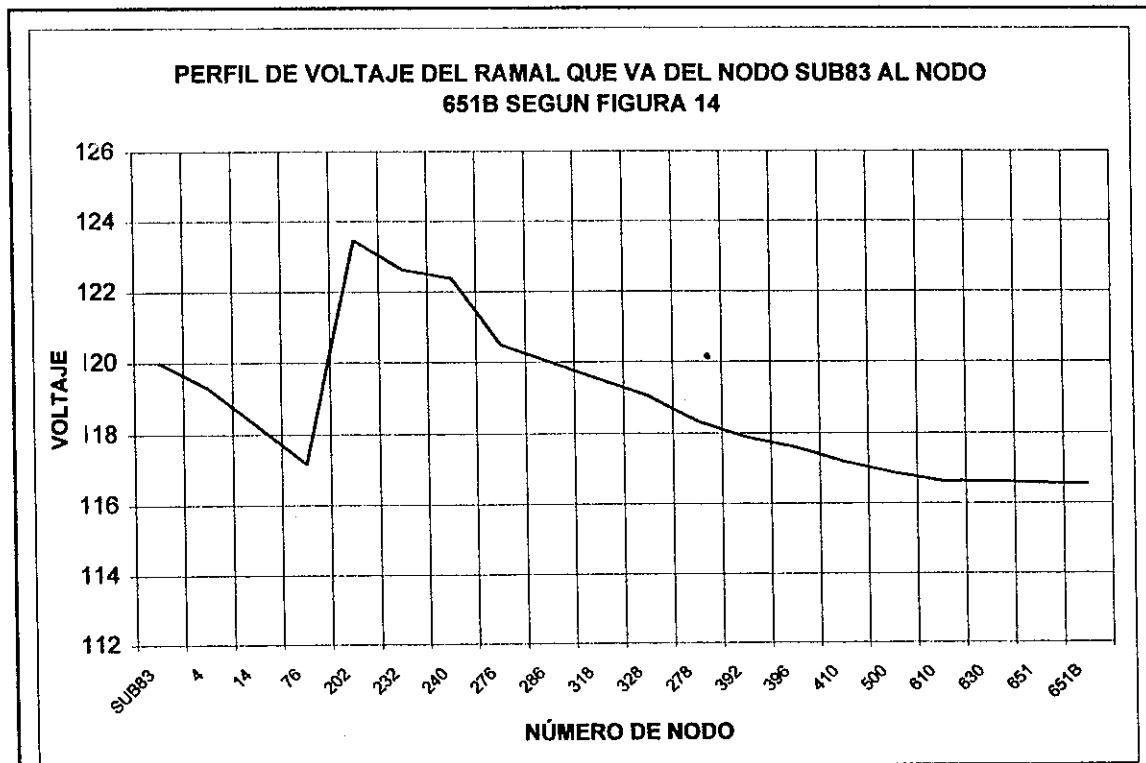
b) Análisis económico

Del valor de voltaje mínimo, anterior al punto de colocación del regulador ( $V_0$ ) encontrado en el análisis técnico, y evaluando la ecuación (3-8) se obtiene el tiempo de efectividad de la opción:

$$te = 2.9 \approx 3 \text{ años}$$



Figura 18. Perfil de voltaje al instalar un regulador de voltaje de línea



Se considera una vida útil de 15 años para el aislamiento de los devanados del regulador, y por tanto para el regulador en general, entonces considerando pagos uniformes cada año respecto al valor de compra del equipo, y despejando la variable A de la ecuación (3-13), se evalúa en ella el valor de  $P = 120\,000$  quetzales que es el costo de inversión de regulador hoy, y para  $n = 15$  años, se encuentra que  $A = 17\,618.93$  quetzales anuales.

Para un período de 3 años, que es el tiempo de efectividad de la opción se tiene ( $3 \cdot 17\,618.93 = 52\,856.79$  quetzales), restando esta cantidad al valor del costo de adquisición de los reguladores, se obtiene el valor de rescate.

El valor presente del ahorro de pérdidas (beneficios), se obtiene de la ecuación (3-11), aquí  $PD_{\max} = 173.4 - 157.9 = 15.5$  kW, evaluando la fórmula se tiene:

$$VPP = 175\,728.75 \text{ quetzales}$$

Por otra parte, el circuito donde se colocaron los reguladores tiene 3 fases y neutro, por tanto el diagrama de la figura 10 resulta ser una conexión adecuada para éste caso, entonces haciendo referencia al diagrama de ésta figura se puede visualizar de una mejor manera donde están invertidos los costos de los materiales y equipos usados en el montaje de los reguladores.

Generalmente, el mantenimiento que reciben éstos aparatos, consiste en la prueba de la rigidez dieléctrica (prueba al aceite), en promedio se considera una prueba cada seis meses, con un costo de 500 quetzales cada una, que hacen un total de 1 000 quetzales anuales, entonces, evaluando la fórmula (3-13) para un total de 3 años se tiene:  $P = 2\,401.85$  quetzales.

Todos los costos que involucra este método de regulación de voltaje se muestran en la tabla IX, (en el montaje del equipo se considera que cada tablero de control está ubicado sobre su propio regulador).

Tabla IX. Costos de inversión que involucra la instalación de reguladores de voltaje afuera de la subestación

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA A FIGURA 10	COSTO EN QUETZALES EN VALOR PRESENTE
3	regulador de voltaje de 167 kVA (promedio)	REG.	120 000.00
3	cuchilla de BY-PASS 14.4 kV, 600 A.	BY-PASS	14802.69
6	pararrayo clase distribución de 10 kV	D	1 134.6
1	estructura para soporte de los reguladores	--	2500
2	poste de concreto de 12.2 metros de longitud	--	2153.44
3	varilla de conexión a tierra	--	63.15
6	soporte pararrayo de 10 kV	--	59.94
7	conectores "T" para cables 1/0 a 500 MCM	E	139.32
3	conector para tierra	--	61.50
12	conector de compresión tipo paleta	F	728.76
6	conector de aluminio a terminal de pararrayo	H	32.28
9	conector de aluminio a terminal de regulador	G	289.80
--	instalación del equipo (personas=3, días=1)	--	300.00
--	transporte	--	30.00
--	mantenimiento	--	2 401.85
15	metro de cable de aluminio 336.4 MCM AAC	--	143.25
--	valor de rescate	--	-67 143.20
	subtotal =		77697.38
--	costos varios (10%)		7769.74
	total =		85467.12

#### 4.4.3 Análisis con cambio de conductores

##### a) Análisis técnico

Ahora el trabajo consiste en hacer un cambio en el calibre de los conductores principales (líneas trifásicas) que alimentan el circuito. Los conductores calibre 336 KCM ACSR, que van desde la salida de la subestación hasta el nodo 651 (ver figura 14) en los ramales principales, se cambiaron por conductores 556 KCM AAAC, los cuales poseen el mayor calibre de los conductores utilizados en el sistema de distribución de EEGSA. Las líneas trifásicas que van desde el nodo 328 hasta el nodo 560, y el de otros

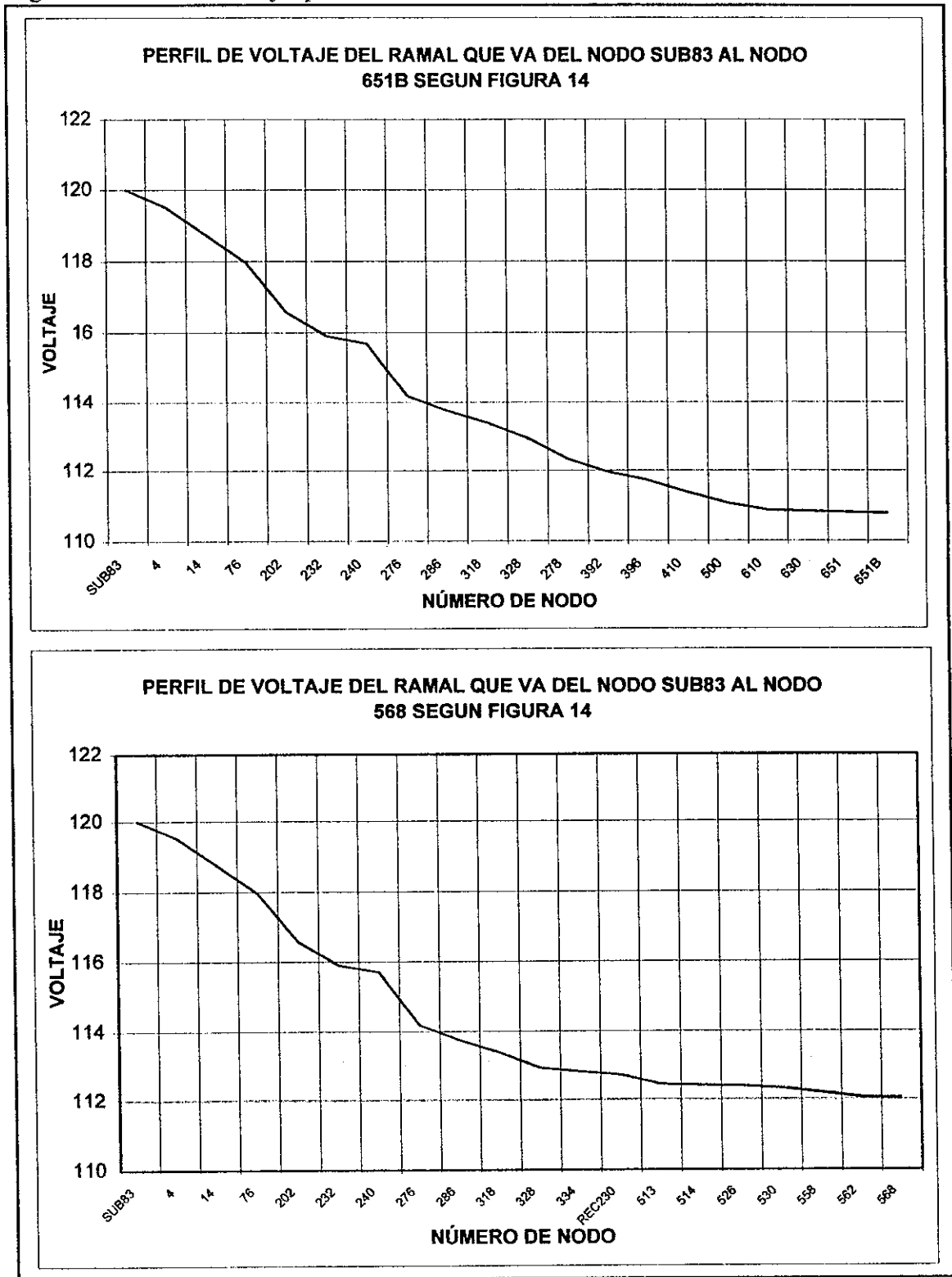
tramos del circuito donde el calibre de los conductores es 2 ACSR, se cambiaron por conductores calibre 4/0 ACSR.

Después de efectuar los cambios correspondientes se efectúa la corrida del programa, el sumario del reporte del flujo de carga que resulta de este análisis se muestra en la tabla X, donde se puede observar que existe una ligera variación en las pérdidas de potencia (en condiciones iniciales 173.4 kW de pérdidas, con cambio de conductores 107.5 kW de pérdidas), además, aunque se mejora el perfil de voltaje, este no se encuentra dentro de los márgenes que determinan las normas (voltaje en el punto más crítico = 93.05%  $\equiv$  110.77 voltios), en la figura 19 se puede observar este comportamiento del voltaje, donde a partir del nodo 286 el voltaje se encuentra abajo del valor mínimo aceptado por las normas ( el nodo 286 está a una distancia aproximada de 23.7 kilómetros, medidos desde la subestación).

Tabla X. Resumen del flujo de carga al efectuar cambio de conductores

18-05-98		EMPRESA ELÉCTRICA DE GUATEMALA, S.A. DATA BASE- C:\DATA\CIRC\CTO83 ANALISIS HACIENDO CAMBIO DE CONDCUTORES							
		LOAD FLOW ANALYSIS SUMMARY							
Start Node= SUB83		Nominal L-N Source Voltage = 7.62 kV Convergence reached in 2 iteraciones							
	Ckt.kVA	Ckt.kW	Ckt.kVAr	SRC.PF%	LD.PF%	Amps	kW Loss	kVAr Loss	
A-Phase	1953.	1692.	976.1	86.62	88.07	254.3	38.81	81.72	
B-Phase	1914	1653.	965.5	86.35	87.99	249.2	37.74	79.15	
C-Phase	1786.	1518.	939.8	85.03	85.74	232.5	30.68	64.30	
Neutral						21.24	.2992	2.631	
Total	5653.	4864.	2881	86.03	87.32		107.5	227.8	
	Max% Ampac.	From	To	Conductor Type	Min% Volt.	At Node	Max% Volt	At Node	
A-Phase	36.12	SUB83	REG83	3F/556/N1/0A	93.05	651B	100.8	SUB83	
B-Phase	35.41	SUB83	REG83	3F/556/N1/0A	95.77	556	100.8	SUB83	
C-Phase	33.03	SUB83	REG83	3F/556/N1/0A	95.92	656	100.8	SUB83	

Figura 19. Perfil de voltaje que resulta del cambio de conductores



#### 4.4.4 Análisis con capacitores en la subestación de distribución

##### a) Análisis técnico

En esta etapa del estudio, se simula la instalación de un banco de capacitores conectados en derivación a la salida de la subestación, tal como se mencionó en el capítulo 2, el propósito general de instalar capacitores en una subestación es suministrar potencia reactiva y aliviar la capacidad de la subestación y de la línea de transmisión, por tanto, la simulación se hizo instalando un banco de 900 kVAr (300 kVAr por fase).

En la tabla XI se observa el sumario del flujo de carga que resulta al instalar el banco (voltaje en el punto crítico = 90.43 %  $\equiv$  107.65 V), en el cual se puede observar las diferencias, respecto a las obtenidas en las condiciones iniciales (ver tabla VI). En este caso no se tomo en cuenta el efecto de los capacitores sobre la línea de alimentación de 69 kV, ya que, ese análisis no es parte de los objetivos de este trabajo.

Tabla XI. Resumen del flujo de carga al instalar banco de capacitores en la subestación

18-05-98		EMPRESA ELÉCTRICA DE GUATEMALA, S.A. DATA BASE- CADATACIRCTO83 INSTALACIÓN DE BANCO DE 900 kVAr EN DERIVACION EN LA SUBESTACION						
LOAD FLOW ANALYSIS SUMMARY								
Start Node= SUB83			Nominal L-N Source Voltage = 7.62 kV Convergence reached in 2 iteraciones					
	Ckt.kVA	Ckt.kW	Ckt.kVAr	SRC.PF%	LD.PF%	Amps	kW Loss	kVAr Loss
A-Phase	1853.	1713.	705.8	92.46	88.11	241.2	62.28	124.6
B-Phase	1825.	1684.	703.8	92.26	88.04	237.2	61.68	122.4
C-Phase	1672.	1532.	669.1	91.64	85.83	217.7	48.76	97.64
Neutral						21.91	.6771	1.815
Total	5350.	4930.	2078.	92.14	87.38		173.4	346.5
	Max% Ampac.	From	To	Conductor Type	Min% Volt.	At Node	Max% Volt	At Node
A-Phase	67.97	SUB83	REG83	3F/336/N1/0A	90.43	651B	100.8	SUB83
B-Phase	67.07	SUB83	REG83	3F/336/N1/0A	92.10	556	100.8	SUB83
C-Phase	62.04	SUB83	REG83	3F/336/N1/0A	93.42	664	100.8	SUB83

#### 4.4.5 Análisis con capacitores en derivación afuera de la subestación

##### a) Análisis técnico

El análisis ahora consiste en instalar bancos de capacitores en las líneas afuera de la subestación. No existe regla alguna para determinar el punto exacto de la instalación del banco para que regule de una mejor manera el voltaje, por lo que se hicieron varias pruebas instalando bancos en diferentes nodos del circuito.

En primer lugar se hicieron tres pruebas preliminares, instalando bancos de capacitores de 900 kVAr en puntos diferentes. Según los reportes de los sumarios de flujo de carga, se observa que para este circuito particular, a medida que el banco se instala en un punto más alejado de la subestación, la regulación de voltaje mejora, sin embargo el beneficio en el ahorro de pérdidas disminuye.

Tomando como base los reportes mencionados anteriormente, se ve que es mejor para este circuito estudiado, instalar los bancos al final de las líneas, por lo que otra prueba consiste en instalar dos bancos de 900 kVAr, uno en el nodo 951 y otro en el nodo 558, el reporte del sumario del flujo de carga que resulta de esta prueba se muestra en la tabla XII, donde se puede ver que estos dos bancos no son suficientes para mejorar la regulación (voltaje mínimo = 95.25%  $\equiv$  113.4 voltios).

Después de efectuar otras pruebas, se encuentra que dos bancos de 900 kVAr instalados en los nodos 651 y 558, y uno de 300 kVAr instalado en el nodo 650 son capaces de mejorar la regulación de voltaje, en la tabla XIII se muestra el resumen del flujo de carga que resulta de ésta prueba, en la cual se puede observar que el voltaje en el punto crítico ( $V_o$ ) es 96.97%  $\equiv$  115.44 voltios. En la figura 20 se encuentra ploteada la curva del perfil de voltaje al instalar los bancos de capacitores de 900 kVAr en los nodos 651 y 558, y de 300 kVAr en el nodo 650.

Tabla XII. Resumen del flujo de carga al instalar banco de capacitores afuera de la subestación en los nodos 651 y 558

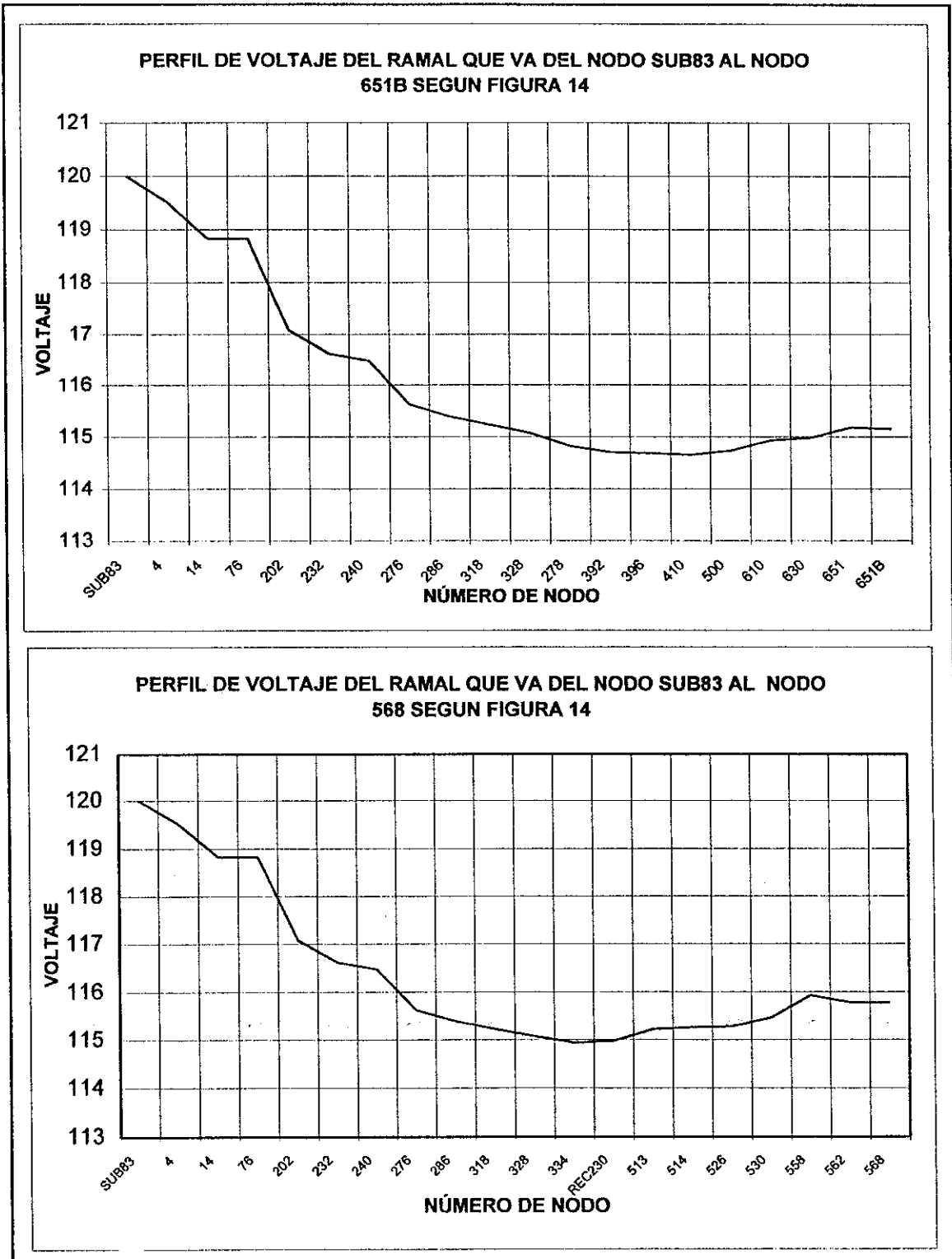
06-09-98	EMPRESA ELÉCTRICA DE GUATEMALA, S.A. DATA BASE- C:\DATA\CIRC\CTO83 INSTALACIÓN DE BANCOS DE 900 kVAr EN NODOS 651 Y 558							
	LOAD FLOW ANALYSIS SUMMARY							
Start Node= SUB83	Nominal L-N Source Voltage = 7.62 Kv Convergence reached in 2 iteraciones							
	Ckt.kVA	Ckt.kW	Ckt.kVAr	SRC.PF%	LD.PF%	Amps	kW Loss	kVAr Loss
A-Phase	1761.	1709.	425.0	97.94	88.07	229.2	57.10	100.4
B-Phase	1936.	1686.	415.3	97.09	87.99	226.0	57.29	99.95
C-Phase	1568.	1524.	368.2	97.20	85.74	204.1	47.66	78.95
Neutral						23.99	.8370	2.235
Total	5066.	4919.	1208	97.11	87.32		162.9	281.6
	Max% Ampac.	From	To	Conductor Type	Min% Volt.	At Node	Max% Volt	At Node
A-Phase	60.18	SUB83	REG83	3F/336/1N	95.25	506	100.8	SUB83
B-Phase	59.33	SUB83	REG83	3F/336/1N	96.78	352	100.8	SUB83
C-Phase	53.59	SUB83	REG83	3F/336/1N	98.00	346	100.8	SUB83

Tabla XIII. Resumen del flujo de carga al instalar bancos de capacitores de 900 kVAr en los nodos 651 y 558, y de 300 kVAr en el nodo 650

06-09-98	EMPRESA ELÉCTRICA DE GUATEMALA, S.A. DATA BASE- C:\DATA\CIRC\CTO83 INSTALACION DE BANCOS DE 900 kVAr EN LOS NODOS 651 Y 558, Y DE 300 kVAr EN EL NODO 650							
	LOAD FLOW ANALYSIS SUMMARY							
Start Node= SUB83	Nominal L-N Source Voltage = 7.62 kV Convergence reached in 3 iteraciones							
	Ckt.kVA	Ckt.kW	Ckt.kVAr	SRC.PF%	LD.PF%	Amps	kW Loss	kVAr Loss
A-Phase	1740.	1710.	321.0	98.28	88.07	226.5	58.03	102.2
B-Phase	1716.	1688.	309.0	98.37	87.99	223.5	58.61	102.4
C-Phase	1546.	1524.	259.4	98.58	85.74	201.3	49.32	82.14
Neutral						24.60	.8869	2.371
Total	5003.	4923.	889.4	98.40	87.32		166.8	289.1
	Max% Ampac.	From	To	Conductor Type	Min% Volt.	At Node	Max% Volt	At Node
A-Phase	59.46	SUB83	REG83	3F/336/1N	96.27	468	100.8	SUB83
B-Phase	58.66	SUB83	REG83	3F/336/1N	97.40	352	100.8	SUB83
C-Phase	52.84	SUB83	REG83	3F/336/1N	98.67	346	100.8	SUB83



Figura 20. Perfil de voltaje al instalar bancos de capacitores en derivación afuera de la subestación



## b) Análisis económico

Evaluando la ecuación (3-8) para  $V_o = 115.44$  voltios, se obtiene el tiempo de efectividad:

$$t_e = 1.34 \text{ años} \approx 1 \text{ año}$$

Haciendo un procedimiento similar al que se hizo para el regulador de voltaje de línea, considerando una vida útil del banco de capacitores igual a 20 años, se encuentra que  $A = 6\,922.11$  quetzales para un período de 1 año. Si ésta cantidad se resta del valor del costo inicial de los capacitores se tiene:  $51\,728.95 - 6\,922.11 = 44\,806.84$  quetzales, que es igual al valor de rescate.

El valor presente del ahorro de pérdidas (beneficios), se obtiene evaluando la ecuación (3-11), para  $P_{Dmax} = 173.4 - 166.8 = 6.6$  kW, y  $t = 1$  año se tiene:

$$VPP = 21\,990.62 \text{ quetzales}$$

Una conexión típica de un banco de capacitores, se muestra en la figura 5. En el estudio efectuado con este método para mejorar la regulación de voltaje, se hace necesario, el uso de dos bancos de capacitores de 900 kVAr cada uno, y de un banco de 300 kVAr. Generalmente en los circuitos de distribución de 13.8 kV los bancos de 600 y 900 kVAr tienen controles de tiempo que actúan sobre interruptores de aceite para conectar y desconectar los capacitores. En cambio los bancos de 300 kVAr son por lo general fijos y por lo tanto no tienen interruptores de aceite. Basado en las anteriores consideraciones y en el diagrama de la figura 5, se presenta la lista que involucra todos los costos de la inversión.

Respecto al mantenimiento no se considera ningún costo, ya que el tiempo de efectividad es únicamente de 1 año, además estos equipos generalmente no reciben mantenimiento preventivo, ya que se sacan de línea cuando la carga del sistema baja. La tabla XIV muestra todos los costos que involucra este método de regulación.

Tabla XIV. Costos de inversión que involucra la instalación de los bancos de capacitores

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	COSTO EN QUETZALES EN VALOR PRESENTE
2	banco de capacitores de 900 kVAr	51 728.95
2	control de capacitores	15 801.96
6	fusible 40T	46.38
3	capacitores de 100 kVAr 95 kV BIL	3 687.80
3	fusible 15T	21.39
1	montura para banco de 300 kVAr	2 000
9	pararrayo clase distribución de 10 kV	1 701.9
9	portafusibles	67.50
3	varilla de conexión a tierra	63.14
18	metro de cable de aluminio No. 4	85.14
9	soporte pararrayo de 10 kV	62.91
3	conector cobre para tierra	65.10
--	instalación del equipo (personas=3, tiempo=4horas)	450.00
--	transporte del equipo	85.00
--	valor de rescate	-44 806.84
	subtotal =	31 089.66
	costos varios (10%)	3 108.96
	total =	34 198.63

#### 4.5 Análisis comparativo entre métodos de regulación

Con los métodos de regulación de voltaje que técnicamente son factibles de implementar, y que por lo tanto se evaluaron económicamente, se hace el siguiente análisis comparativo el cual se muestra en tabla XV.

Tabla XV. Comparación de la relación beneficio/costo de los métodos de regulación de voltaje

MÉTODO DE REGULACIÓN DE VOLTAJE	TIEMPO DE EFECTIVIDAD (AÑOS)	VOLTAJE MÍNIMO (VOLTIOS)	BENEFICIO (QUETZALES EN VALOR PRESENTE)	COSTO (QUETZALES EN VALOR PRESENTE)	RELACION BENEFICIO/COSTO
Reguladores de voltaje de línea instalados afuera de la subestación	3	116.90	175 728.75	85 467.12	2.06
Bancos de capacitores instalados en derivación en las líneas afuera de la subestación	1	115.44	21 990.62	34 198.63	0.64

Del anterior análisis comparativo se puede observar que la opción que presenta la mayor magnitud numérica de la relación beneficio/costo es la instalación de reguladores de voltaje de línea, lo que hace deducir que esta alternativa es la más favorable de ponerse en práctica en este caso analizado, ya que en otros casos podría ser más deseable instalar potencia reactiva.

## CONCLUSIONES

1. La aplicación del regulador de voltaje de línea demuestra ser entre los diferentes métodos de regulación, un equipo técnica y económicamente muy efectivo, flexible y confiable para mantener el nivel de voltaje dentro de los márgenes de calidad del servicio en circuitos eléctricos de distribución rural.
2. Cuando en los circuitos de distribución no existe posibilidad de instalar carga en puntos intermedios o puntos ubicados entre la subestación y el regulador de voltaje de línea, la capacidad de distribución de las líneas o circuitos de distribución se incrementa notablemente, lo que permite la incorporación de nuevos ramales.
3. Es labor del ingeniero formular y examinar todas las alternativas de solución que existen para un determinado propósito, y poder así tomar decisiones considerando las eficiencias económicas y de ingeniería, para lo cual el análisis de beneficio/costo, demuestra ser un método muy efectivo y de fácil aplicación.

## RECOMENDACIONES

1. Las empresas distribuidoras de energía eléctrica deberán mejorar la regulación de voltaje en los circuitos de distribución que no cumplen con las normas de calidad de los servicios eléctricos, ya que además de poder ser sancionadas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, trae como consecuencia una reducción de pérdidas, lo que redunda en beneficios económicos.
2. A pesar que las características de los circuitos de distribución rural son similares, es aconsejable que los diferentes métodos de regulación de voltaje se evalúen técnica y económicamente para cada circuito particular que se va a estudiar, ya que en algunos casos puede no resultar ser el regulador de voltaje de línea la mejor alternativa de solución.

## BIBLIOGRAFIA

1. ABOYTES García, Florencio. **Análisis de sistemas eléctricos de potencia**. México: s.e., 1990.
2. AHUJA, Hira y Michael Walsh. **Ingeniería de costos y administración de proyectos**. España: Editorial Alfaomega, 1989.
3. ESPINOSA, Roberto. **Sistemas de distribución**. Primera edición. México: Editorial Limusa, 1990.
4. FINK, Donald y Wayne Beaty. **Manual de ingeniería eléctrica**. Decimotercera edición. Mexico: Editorial McGraw-Hill, 1996.
5. GIMENEZ Ramírez, Alberto. **Utilización de reguladores automáticos de tensión en electrificación rural**. Venezuela: s.e., 1973
6. HERRERA Sánchez, Ricardo y Luis Noyola. **Consideraciones sobre el uso de reguladores de voltaje en sistemas de distribución rural**. El Salvador: s.e., 1989
7. PANSINI, Anthony. **Electrical Distribution Engineering**. Singapore: editorial McGraw-Hill 1986.
8. RIGGS, James. **Ingeniería económica**. España: Editorial Alfaomega, 1990.
9. RIVERA, Hugo Manuel. **Métodos para la regulación de voltaje en líneas de transmisión y distribución**. Tesis Ing. Mecánico electricista. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de ingeniería. 1974.
10. SIEMENS Energy & Automation, Inc. **Introduction to voltage regulation**. U.S.A., s.e 1981.
11. TAYLOR, Georg. **Ingeniería económica**. 2ª. Edición. México: Editorial Limusa, 1990.
12. WESTINGHOUSE Electric Corporation. **Electrical transmission and distribution reference book**. Fourth edition. U.S.A.: s.e., 1964.

## ANEXO 1

### DETERMINACIÓN DE FACTORES DE PÉRDIDAS

(Autor: Ing. Roberto Urdiales Contreras)

#### INTRODUCCIÓN

Por lo general, para el cálculo del factor de pérdida no se conoce la curva de la carga de los diferentes circuitos primarios y secundarios que es necesario analizar en el diseño de redes de distribución, o para el cálculo de dimensionamiento del conductor para una instalación interna, por lo que se prefiere utilizar métodos aproximados, que tienen la ventaja de basarse en el factor de carga, porque usualmente se tiene un estimativo razonable del factor de carga de la demanda correspondiente.

En varias de las publicaciones técnicas especializadas que existen sobre el tema, se encuentran diversas fórmulas empíricas para un calculo aproximado del factor de pérdidas, que producen confusión y discusiones internas en las instituciones sobre cual de ellas usar, razon por la cual el objetivo del trabajo fue realizar un trabajo estadístico para comparar el grado de diferencia entre cada formula y el método de integración, que resulta ser de mayor exactitud. Las fórmulas que se tomaron para la comparación son las siguientes:

FÓRMULA DE EBASCO:

$$FP = 0.85*FC^2 + 0.15*FC$$

VARIANTE DE LA FÓRMULA DE EBASCO:

$$FP = 0.70*FC^2 + 0.30*FC$$

FÓRMULA DE DEWBERRY:

$$FP = FC^2 + 0.273 (FC - K)^2$$



donde  $K$  = relación entre la demanda mínima y la máxima.

### **RESULTADOS DEL ESTUDIO:**

Aplicando los diferentes métodos a las curvas de carga diaria en intervalos de 15 minutos para un total de 84 circuitos de distribución de Empresa Eléctrica de Guatemala, S. A., los resultados indicaron que respecto al método de integración, las fórmulas con menor desviación estándar fueron las de EBASCO, seguida por la de DEWBERRY. Estos resultados se muestran en la tabla XVI la cual es una información parcial.

En función de los resultados obtenidos y por el hecho de una mayor facilidad en el cálculo con la curva de EBASCO, esta es la relación que se ha recomendado aplicar para el cálculo de los factores de pérdidas.

Tabla XVI. Tabla de cálculo de factores de pérdida

CTO.	CALCULO FACTOR DE CARGA				INTEG. DATOS SCADA				METODOS DE CALCULO F.P.				CALC. DE DESVIACIONES CUADRADAS			
	AVG. S	S MAX.	% S MIN	FC	AVG. S <sup>2</sup>	S <sup>2</sup> MAX	F.P.	85%	70%	DEWBERR	AVG 85-D	85%	70%	DEWBERR	AVG 85-D	
57	3.010	5.383	0.274	55.9%	9.9350	95.981	34.3%	35.0%	38.7%	33.5%	34.2%	4.56E-5	1.91E-3	6.35E-5	3.71E-7	
58	3.220	5.920	0.283	54.4%	11.453	35.046	32.7%	33.3%	37.0%	31.4%	32.4%	3.81E-5	1.88E-3	1.57E-4	1.00E-5	
59	3.966	6.480	0.311	61.2%	17.317	41.995	41.2%	41.0%	44.6%	39.9%	40.5%	4.85E-6	1.12E-3	1.71E-4	5.83E-5	
67	2.654	3.746	0.177	70.8%	7.303	14.036	52.0%	53.3%	56.4%	57.9%	55.6%	1.51E-4	1.87E-3	3.41E-3	1.25E-3	
68	3.140	4.874	0.344	64.4%	10.555	23.752	44.4%	45.0%	48.4%	44.0%	44.5%	2.69E-5	1.56E-3	2.10E-5	8.98E-8	
69	3.659	7.980	0.333	45.9%	14.047	63.685	22.1%	24.8%	28.3%	21.5%	23.1%	7.27E-4	4.12E-3	3.55E-5	1.10E-4	
71	5.188	8.059	0.372	64.4%	27.979	64.941	43.1%	44.9%	48.3%	43.5%	44.2%	3.26E-4	2.73E-3	1.44E-5	1.19E-4	
75	0.408	0.665	0.412	61.1%	0.172	0.442	38.9%	40.9%	44.5%	38.4%	39.7%	3.79E-4	3.04E-3	2.86E-5	4.99E-5	
76	0.635	1.059	0.414	59.9%	0.418	1.121	37.2%	39.5%	43.1%	36.9%	38.2%	5.26E-4	3.47E-3	1.38E-5	9.22E-5	
79	1.181	1.629	0.507	72.5%	1.419	2.653	53.5%	55.6%	58.6%	53.9%	54.7%	4.36E-4	2.58E-3	1.57E-5	1.54E-4	
81	1.896	3.537	0.315	53.6%	3.885	12.512	31.0%	32.5%	36.2%	30.1%	31.3%	1.97E-4	2.64E-3	9.95E-5	4.10E-6	
82	4.383	6.487	0.404	67.6%	20.315	42.076	48.3%	48.9%	52.2%	47.7%	48.3%	4.28E-5	1.53E-3	3.81E-5	3.45E-8	
83	3.105	5.048	0.370	61.5%	10.241	25.486	40.2%	41.4%	44.9%	39.5%	40.4%	1.41E-4	2.25E-3	5.30E-5	5.26E-6	
84	4.266	5.674	0.448	75.2%	18.764	32.190	58.3%	59.3%	62.1%	59.1%	59.2%	1.07E-4	1.47E-3	5.81E-6	8.06E-5	
85	3.122	4.742	0.304	65.8%	10.585	22.483	47.1%	46.7%	50.1%	46.8%	46.8%	1.19E-5	9.17E-4	8.36E-6	1.01E-5	
86	2.763	4.485	0.304	61.6%	8.471	20.117	42.1%	41.5%	45.1%	40.6%	41.1%	3.57E-5	8.71E-4	2.21E-4	1.08E-4	
87	4.259	7.550	0.247	56.4%	21.791	56.998	38.2%	35.5%	39.2%	34.6%	35.0%	7.39E-4	9.39E-5	1.34E-3	1.02E-3	
88	0.737	1.134	0.462	65.0%	0.567	1.287	44.1%	45.6%	49.0%	43.2%	44.4%	2.39E-4	2.46E-3	8.18E-5	1.03E-5	
89	2.656	4.803	0.276	55.3%	7.822	23.067	33.9%	34.3%	38.0%	32.7%	33.5%	1.47E-5	1.67E-3	1.50E-4	1.77E-5	
90	4.334	6.604	0.335	65.6%	20.446	43.608	46.9%	46.5%	49.8%	45.9%	46.2%	1.80E-5	8.76E-4	9.65E-5	4.94E-5	
91	2.803	5.183	0.275	54.1%	8.730	26.863	32.5%	33.0%	36.7%	31.2%	32.1%	2.24E-5	1.76E-3	1.75E-4	1.81E-5	
92	3.212	5.558	0.305	57.8%	10.981	30.896	35.5%	37.1%	40.7%	35.4%	36.2%	2.29E-4	2.68E-3	1.13E-6	4.95E-5	
93	3.850	6.093	0.278	63.2%	16.742	37.129	45.1%	43.4%	46.9%	43.3%	43.4%	2.85E-4	3.24E-4	3.11E-4	2.98E-4	
94	1.218	2.180	0.232	55.8%	1.682	4.753	35.4%	34.8%	38.5%	34.0%	34.4%	3.60E-5	9.61E-4	1.97E-4	1.00E-4	
95	0.747	1.232	0.162	60.6%	0.602	1.517	39.7%	40.3%	43.9%	42.1%	41.2%	4.68E-5	1.82E-3	6.19E-4	2.51E-4	
96	1.373	2.404	0.398	57.1%	1.984	5.779	34.3%	36.3%	39.9%	33.4%	34.8%	3.77E-4	3.15E-3	8.35E-5	2.64E-5	
97	3.162	5.344	0.329	59.2%	11.369	28.560	39.8%	38.6%	42.2%	36.9%	37.7%	1.41E-4	5.94E-4	8.61E-4	4.25E-4	
98	1.265	2.290	0.144	55.2%	2.099	5.243	40.0%	34.2%	37.9%	35.1%	34.6%	3.39E-3	4.47E-4	2.48E-3	2.92E-3	
100	2.563	5.933	0.092	43.2%	8.321	35.195	23.6%	22.4%	26.0%	21.8%	22.1%	1.67E-4	5.71E-4	3.27E-4	2.40E-4	
101	2.977	5.747	0.270	51.8%	9.869	33.031	29.9%	30.6%	34.3%	28.5%	29.5%	4.77E-5	1.97E-3	1.89E-4	1.17E-5	
102	2.732	4.245	0.349	64.4%	7.979	18.023	44.3%	44.9%	48.3%	43.8%	44.3%	3.53E-5	1.63E-3	2.30E-5	3.28E-7	
103	3.932	7.110	0.295	55.3%	17.040	50.552	33.7%	34.3%	38.0%	32.4%	33.3%	3.42E-5	1.84E-3	1.72E-4	1.31E-5	
105	2.342	4.281	0.258	54.7%	5.894	18.327	32.2%	33.6%	37.4%	32.2%	32.9%	2.21E-4	2.71E-3	2.14E-7	5.24E-5	
106	3.877	6.508	0.244	59.6%	16.817	42.349	39.7%	39.1%	42.7%	38.9%	39.0%	3.63E-5	9.06E-4	7.13E-5	5.24E-5	
109	3.687	5.653	0.336	65.2%	14.639	31.954	45.8%	46.0%	49.4%	45.3%	45.6%	1.97E-6	1.25E-3	2.89E-5	3.94E-6	
110	4.088	7.150	0.299	57.2%	18.223	51.129	35.6%	36.4%	40.0%	34.7%	35.5%	5.24E-5	1.93E-3	8.33E-5	8.93E-7	
113	2.974	5.182	0.253	57.4%	9.698	26.858	36.1%	36.6%	40.3%	35.7%	36.2%	2.44E-5	1.73E-3	1.30E-5	4.48E-7	
114	2.829	5.186	0.313	54.5%	8.707	26.895	32.4%	33.5%	37.2%	31.2%	32.3%	1.19E-4	2.32E-3	1.34E-4	1.01E-7	
117	3.292	5.685	0.270	57.9%	11.722	32.320	36.3%	37.2%	40.8%	36.1%	36.7%	8.46E-5	2.09E-3	1.63E-6	1.57E-5	
118	5.150	7.097	0.275	72.6%	27.546	50.373	54.7%	55.6%	58.6%	58.2%	56.9%	9.00E-5	1.55E-3	1.23E-3	4.97E-4	
												0.0018	0.0043	0.0022	0.0018	