

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

ANALISIS TECNICO ECONOMICO DEL USO DE CONDENSADORES  
Y REGULADORES DE TENSION EN ALIMENTADORES  
DE DISTRIBUCION

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE  
INGENIERO ELECTRICO  
EN LA ESPECIALIZACION DE POTENCIA

TITO LEONEL BRAVO MALDONADO

Quito, febrero de 1978

CERTIFICACION:

Certifico que el presente trabajo ha sido realizado por el señor Tito Leonel Bravo Maldonado.



ING. JULIO JURADO

Director de Tesis



AGRADECIMIENTO:

Presento mis agradecimientos de gratitud al Ing. Julio Jurado, quien con su guía hizo posible el desarrollo del presente trabajo.

## INDICE GENERAL

	Página
CAPITULO I	
Introducción	
1.1 Alcance y objetivo	1
1.2 Necesidad de la regulación de la tensión en sistemas de distribución.	2
1.2.1 Necesidad técnica	3
1.2.1.1 Variación de la tensión	3
1.2.1.2 Efectos de la variación de la tensión en los equipos	5
1.2.2 Importancia económica	7
CAPITULO II	
Uso de condensadores	
2.1 Introducción	9
2.2 Aplicación en distribución	9
2.2.1 Uso de condensadores en subestaciones	10
2.2.2 Uso de condensadores en alimentadores	11
2.3 Uso de capacitores en derivación	11
2.3.1 Reducción de pérdidas de potencia y energía	12
2.3.2 Incremento de los niveles de tensión	15
2.3.2.1 Cuidados de utilización	17
2.3.3 Incremento de la capacidad del sistema	18
2.3.4 Mejoras en el factor de potencia	19

2.4	Uso de capacitores en serie	20
2.4.1	Ventajas	20
2.4.2	Desventajas	22
2.5	Uso de condensadores síncronos	23
CAPITULO III		
Análisis económico del uso de capacitores		
3.1	Introducción	25
3.2	Ventajas económicas	25
3.2.1	Incremento de la capacidad del sistema	25
3.2.2	Reducción de pérdidas	26
3.2.3	Aumento de rendimientos debido al incremento de la tensión.	28
3.2.3.1	Cálculo de los aumentos de rendimientos por energía.	30
3.2.3.2	Cálculo de los aumentos de rendimientos por demanda.	30
3.3	Evaluación de costos de instalación	32
3.4	Relación BENEFICIO-COSTO	33
CAPITULO IV		
Uso de reguladores de tensión.		
4.1	Introducción	35
4.2	Generalidades	35
4.2.1	Tipos de reguladores de tensión	35
4.2.1.1	Reguladores de tensión tipo paso	35
4.2.1.2	Reguladores de tensión tipo inducción	36
4.2.2	Aplicación de reguladores	37
4.2.2.1	Aplicación de reguladores en subestaciones	37

4.2.2.2 Aplicación de reguladores en alimentadores	38
4.3 Determinación de los KVA nominales del regula_	
dor	39
4.3.1 Determinación de los KVA nominales de regula	
ladores instalados en circuitos monofásicos	39
4.3.2 Determinación de los KVA nominales de regula	
dores instalados en circuitos trifásicos	40
4.3.2.1 Instalación de un regulador trifásico en	
un circuito en estrella-cuatro conductores	40
4.3.2.2 Instalación de un banco de tres reguladores	
monofásicos en un circuito en delta cerrado	41
4.3.2.4 Instalación de dos reguladores monofásicos	
en un circuito en delta abierto	42
4.4 Calibración y control de reguladores	43
4.4.1.1 Ancho de banda	43
4.4.2 Relé de retardo de tiempo	45
4.4.3 Compensador de caída de tensión en la línea	
(LDC)	46
4.5 Comparación entre el uso de reguladores y capa	
citores	48

## CAPITULO V

### Análisis económico del uso de reguladores de tensión

5.1 Introducción	50
5.2 Ventajas económicas	50
5.2.1 Aumentos de rendimientos por energía	50
5.2.2 Aumentos de rendimientos por demanda	51
5.3 Evaluación de costos de instalación	52

5.4 Relación BENEFICIO-COSTO	53
CAPITULO VI	
Ejemplo de aplicación	
6.1 Datos del problema	54
6.2 Instalación de capacitores	55
6.3 Instalación de reguladores de tensión	60
CAPITULO VII	
Conclusiones y recomendaciones	
7.1 Conclusiones	62
7.2 Recomendaciones	63
Bibliografía	65

#### INDICE DE TABLAS

1.1 Zonas de variación de la tensión	4
3.1 Variación del consumo de acuerdo con las variaciones de la tensión.	31
4.1 Incremento de la capacidad del regulador al reducir su rango de regulación	36
4.2 Comparación entre el uso de reguladores y capacitores.	49

#### INDICE DE FIGURAS

1.1 a Características de las lámparas incandescentes en función de la tensión
1.1 b Características de las lámparas fluorescentes en función de la tensión.

- 1.2 Características de los motores de inducción en función de la tensión.
- 1.3 Efecto de la variación de la tensión en los equipos de calefacción eléctrica.
- 2.1 Diagrama unifilar de un alimentador trifásico con carga uniformemente distribuida y resistencia uniforme.
- 2.2 Diagrama de la instalación de un banco de capacitores en un alimentador.
- 2.3 Diagrama vectorial de la tensión y corriente de un alimentador con capacitores instalados en él.
- 2.4 Diagrama vectorial de las potencias al instalar capacitores.
- 2.5 Diagrama de los vectores de tensión y corriente cuando se instalan capacitores en serie.
- 4.1 Ubicación de los reguladores en alimentadores de acuerdo con los tipos de carga.
- 4.2 Diferentes tipos de instalación de reguladores.
- 4.3 Diagrama fasorial de las tensiones cuando se instalan dos reguladores monofásicos en un circuito en delta abierto.
- 4.4 Diagrama de bloques del circuito de control del regulador.
- 4.5 Diagrama del ancho de banda efectivo del regulador.
- 4.6 Diagrama del circuito del control y diagrama del compensador de caída de tensión en la línea.

## CAPITULO I

### INTRODUCCION.

Al diseñar un sistema de distribución de energía eléctrica, o al realizar la evaluación del mismo, siempre se deberá tomar en cuenta: el control o regulación de la tensión, protección y economía, para que el diseño esté de acuerdo con la confiabilidad y calidad del servicio eléctrico.

Quando las redes de distribución están operando, encontramos un gran número de problemas, uno de ellos y cuya importancia es netamente eléctrica es la regulación de la tensión. No se controla la tensión en algunos sistemas de distribución del país debido a que este problema se lo ha relegado a un segundo plano, lo que trae molestias a los usuarios y produce pérdidas económicas a la empresa, como se analizará en el desarrollo del presente trabajo.

#### 1.1 Alcance y objetivo.

El principal objeto de la regulación de la tensión en un sistema de distribución es suministrar al usuario una tensión que esté dentro de los límites normalmente aceptables.

En el capítulo I se analizará la necesidad de la regulación de la tensión en un sistema de distribución, tanto en el aspecto técnico como en el económico.

En el capítulo II se lleva a cabo un estudio de la instalación de condensadores estáticos o síncronos, estableciendo las ventajas y desventajas del uso de estos.

En el capítulo III se hará un estudio económico del uso de condensadores, particularizando un beneficio económico para cada ventaja técnica de la aplicación de estos equipos.

En el capítulo IV se efectuará un estudio del uso de reguladores de tensión, finalizando el estudio técnico con una comparación con los condensadores.

En el capítulo V se efectúa un estudio económico del uso de reguladores de tensión, estableciendo el aumento de rendimientos económicos debido al incremento de tensión que se obtiene con estos equipos.

En el capítulo VI se desarrolla un ejemplo práctico de aplicación del estudio efectuado en los capítulos anteriores.

Finalmente en el capítulo VII de la presente tesis se establecen las conclusiones y recomendaciones.

Este estudio tiende a optimizar el uso de condensadores y reguladores de tensión en alimentadores de distribución, lo cual servirá de guía para encontrar una solución entre las varias que existen en el problema de la regulación de la tensión en un sistema de distribución.

## 1.2 Necesidad de la regulación de la tensión en sistemas de distribución.

En el desenvolvimiento técnico actual, las empresas eléctricas deben procurar satisfacer siempre las necesidades de los consumidores de energía eléctrica; la empresa deberá entregar un servicio continuo de energía y un nivel de tensión aceptable.

Un sistema de distribución ideal es el que mantiene la tensión constante e invariable, sin embargo ningún sistema puede funcionar con tensión uniforme a lo largo de todos los circuitos, la causa

causa de esto es la caída de potencial a lo largo de los diferentes elementos que componen la red.

### 1.2.1 Necesidad técnica.

La principal justificación para que se efectúe la regulación de la tensión en un sistema de distribución es que los usuarios puedan obtener una tensión acorde con las limitaciones de diseño de sus aparatos. La tensión de placa generalmente está dada por las normas de diseño y debe estar en relación con la tensión de la red de distribución. Cuando en algún aparato se aplica una tensión que tiene gran variación con respecto a la tensión de diseño este funciona mal, acortándose la expectativa de vida del equipo.

#### 1.2.1.1 Variación de la tensión.

Debido a limitaciones en su mayor parte económicas, resulta imposible entregar al usuario una tensión constante exactamente igual a la tensión de placa de sus aparatos.

En todo sistema de distribución encontraremos la máxima caída de tensión en la hora pico, y la caída será mínima cuando la carga sea ligera. La diferencia entre la máxima y la mínima caída de tensión se denomina "amplitud de variación de la tensión". Esta variación se ha definido en tres zonas: favorable, tolerable y extrema.

Zona favorable: esta zona cubre un rango que incluye la tensión nominal de funcionamiento de la red, siendo este rango de variación el aceptado normalmente para el buen funcionamiento de los equipos, los sistemas deben ser proyectados de modo que trabajen

dentro de esta zona.

Zona tolerable: esta zona altera ligeramente las tensiones de funcionamiento en un dos ó tres por ciento sobre o bajo la zona favorable. El funcionamiento en esta zona debe ser temporario, los equipos aún trabajan satisfactoriamente.

Zona extrema: está en un dos a un tres por ciento sobre y bajo la zona tolerable, el tiempo de funcionamiento dentro de esta zona debe ser muy corto, solamente en condiciones anormales y de emergencia, por ejemplo cuando sea necesario transferir cargas de un circuito a otro por fallas del sistema.

La variación de la tensión dentro de cada zona se puede ver en la tabla 1.1

Tensión nominal del sistema.	Zonas de tensión					
	Favorable		Tolerable		Extrema	
	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima
120	125	110	127	107	131	103
120/240	125/250	110/220	127/254	107/214	131/260	103/209
120/208	125/217	114/197	127/220	107/214	131/225	107/190
240	240	210	250	200	260	190
480	480	420	500	400	520	380

TABLA 1.1.-Zonas de variación de la tensión.

El límite superior se controla mas fácilmente porque depende de las condiciones iniciales del sistema, el límite inferior depende del crecimiento de áreas servidas y de las demandas futuras, factores que son difícilmente previsibles.

### 1.2.1.2 Efectos de la variación de la tensión en los equipos.

Cuan

do cualquier aparato está funcionando con una tensión diferente a la de diseño, tanto su vida como su operación sufre alteraciones.

La energía se utiliza en aparatos de iluminación, motores de inducción, aparatos de calefacción eléctrica y electrónicos.

a-Efecto en la iluminación. Un aumento de la tensión produce un aumento del rendimiento lumínico, pero disminuye la vida útil de las lámparas con la consiguiente pérdida económica.

En cambio una disminución en la tensión trae consigo un bajo rendimiento lumínico, pero la vida de la lámpara aumenta considerablemente, lo cual va en contra de su función que es iluminar.

En la figura 1.1 (a) podemos observar lo explicado anteriormente.

En el caso de las lámparas fluorescentes (figura 1.1 b), la tensión debe tener un valor apropiado, debido a que un bajo nivel de tensión produce una disminución de la tensión de los electrodos reduciéndose como consecuencia la emisión electrónica, lo que origina una disminución en su rendimiento lumínico.

La disminución de la tensión dificulta el arranque de la lámpara lo cual afecta la capa que emite electrones, incidiendo directamente en la vida de la lámpara.

Un aumento de la tensión incrementa la emisión lumínica y al ser la corriente mayor que la nominal, llegando en algunos casos a la destrucción total de la lámpara o de sus accesorios.

En las lámparas de mercurio las disminuciones bruscas de tensión pueden extinguir el arco y los arranques excesivos llegan a afectar la vida de la lámpara.

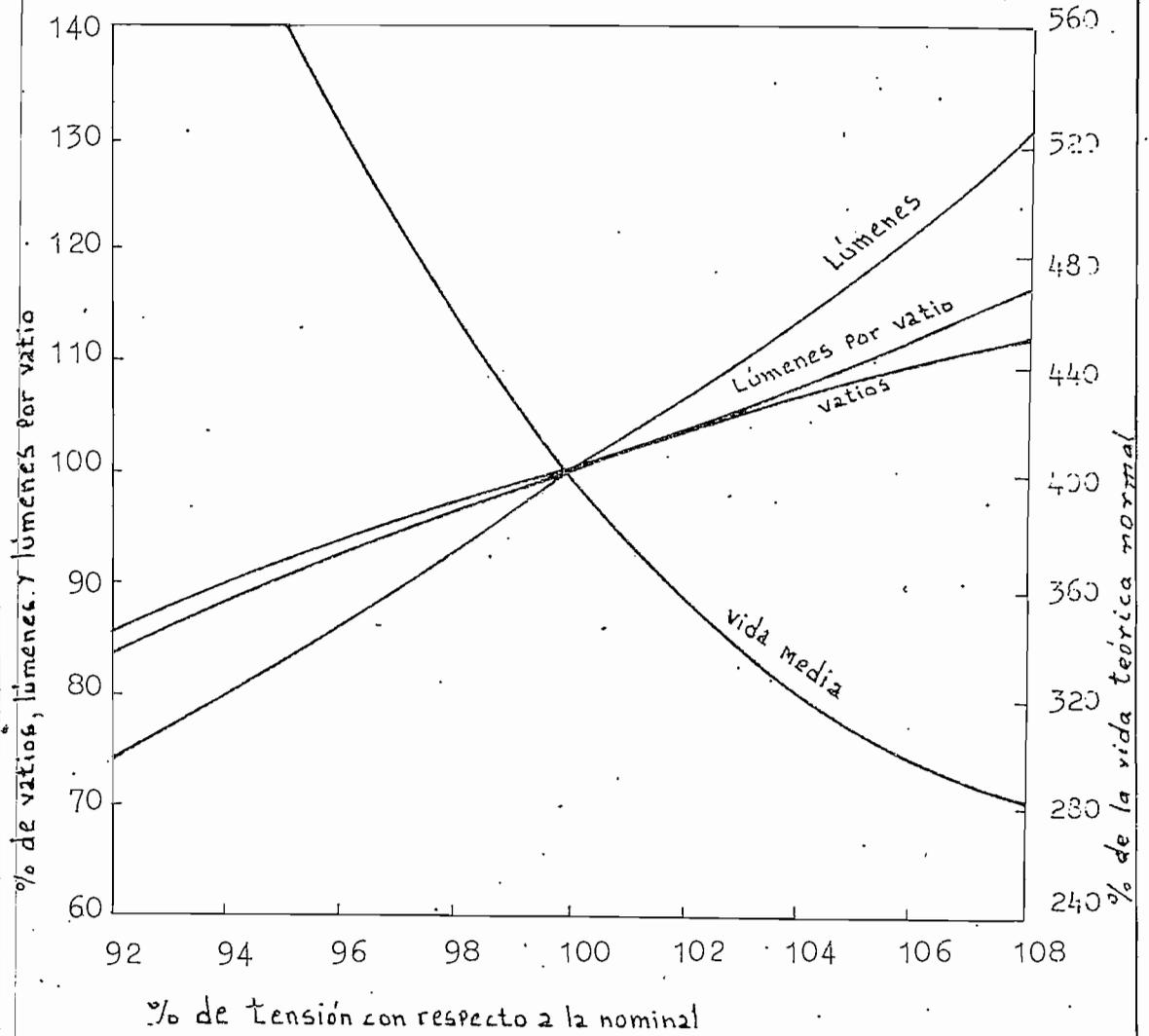


FIGURA 1.1 a

CARACTERISTICAS DE LAS LAMPARAS INCANDESCENTES  
 EN FUNCION DE LA TENSION

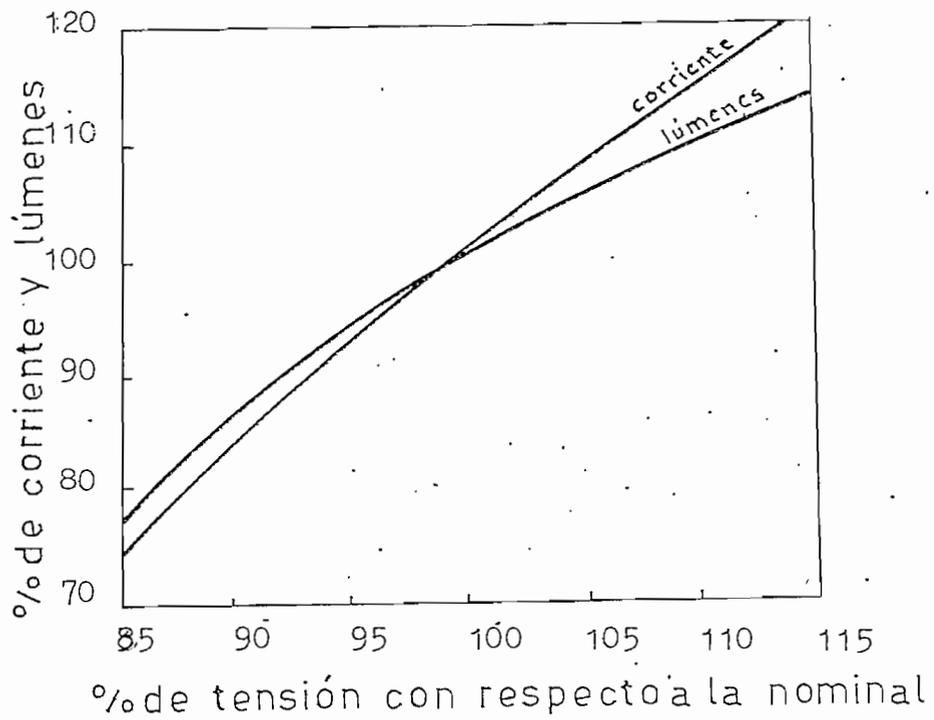


FIGURA 1.1 b

CARACTERISTICAS DE LAS LAMPARAS FLUORESCENTES EN  
FUNCION DE LA TENSION

b-Efectos en los motores de inducción.--En los motores de inducción el par de arranque, el par crítico y el par de operación normal del motor son proporcionales al cuadrado de la tensión aplicada.

Cuando se reduce la tensión el par de arranque disminuye, y si se reduce la tensión cuando el motor está operando, su velocidad disminuye existiendo un incremento de la <sup>corriente</sup> tensión absorbida, lo cual sobrecalienta los bobinados del motor, incidiendo directamente en la vida de los aislantes.

Cuando se incrementa la tensión aumenta el par motor, y si llega a valores elevados puede ocasionar un daño irreparable al motor.

Si se aumenta la tensión el factor de potencia disminuye perjudicando al sistema si la carga del motor es grande. El efecto de la variación de la tensión en los motores de inducción puede observarse en la figura 1.2)

c-Efecto en equipos de calefacción eléctrica.--La calefacción eléctrica se usa en el servicio: doméstico, comercial e industrial. El calor producido por estos aparatos es directamente proporcional al cuadrado de la tensión aplicada.

En el uso doméstico esto no tiene mucha importancia, pero en la industria si lo tiene, ya que un incremento o decremento de la energía calórica, influye directamente en la calidad y número de unidades de producción.

Los valores de tensión por encima del nominal pueden disminuir la vida de las resistencias, inductancias y dieléctricos que forman parte de estos equipos. (Esto se puede observar en la figura 1.3).

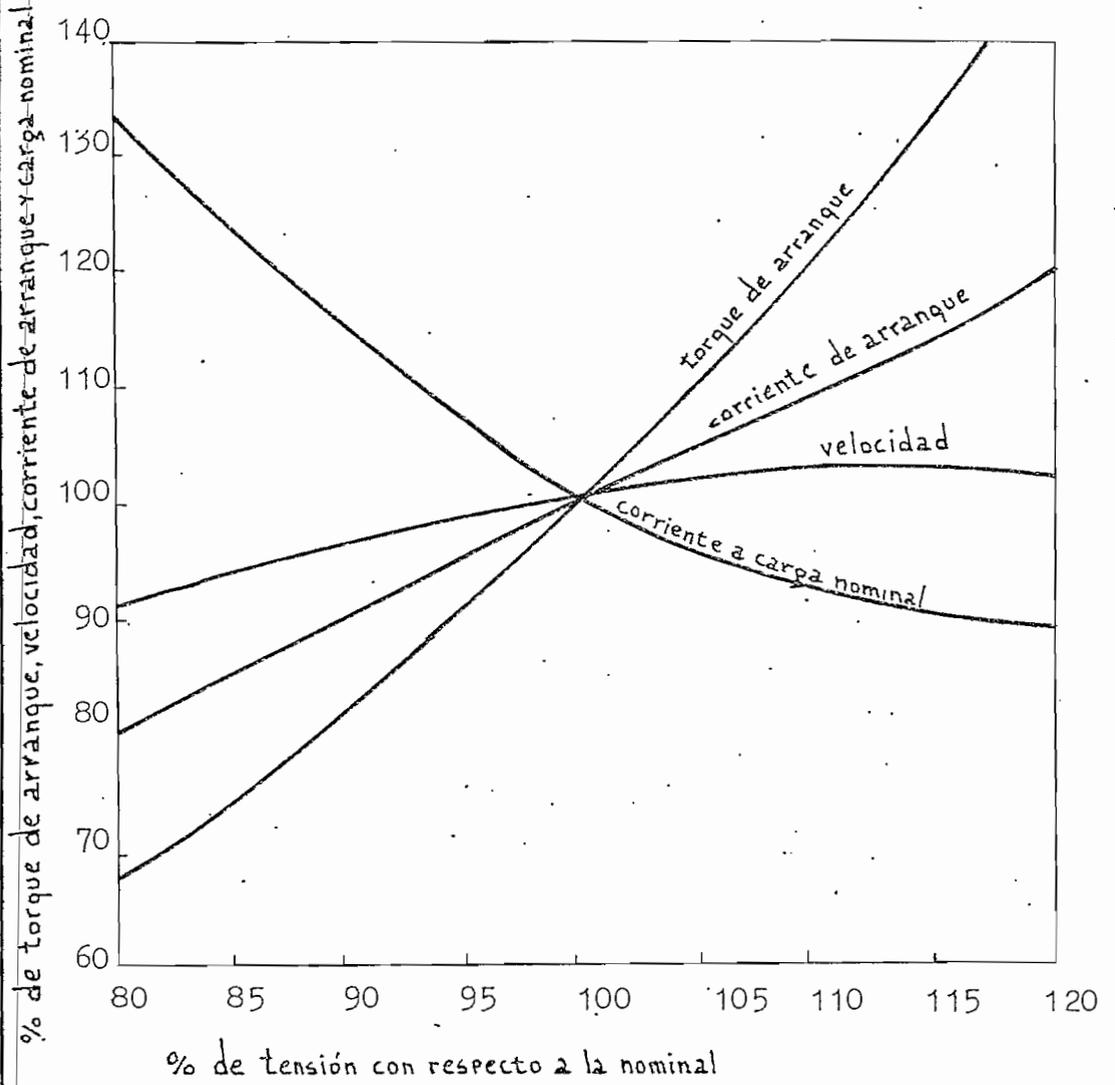


FIGURA 1.2

CARACTERISTICAS DE LOS MOTORES DE INDUCCION EN  
 FUNCION DE LA TENSION

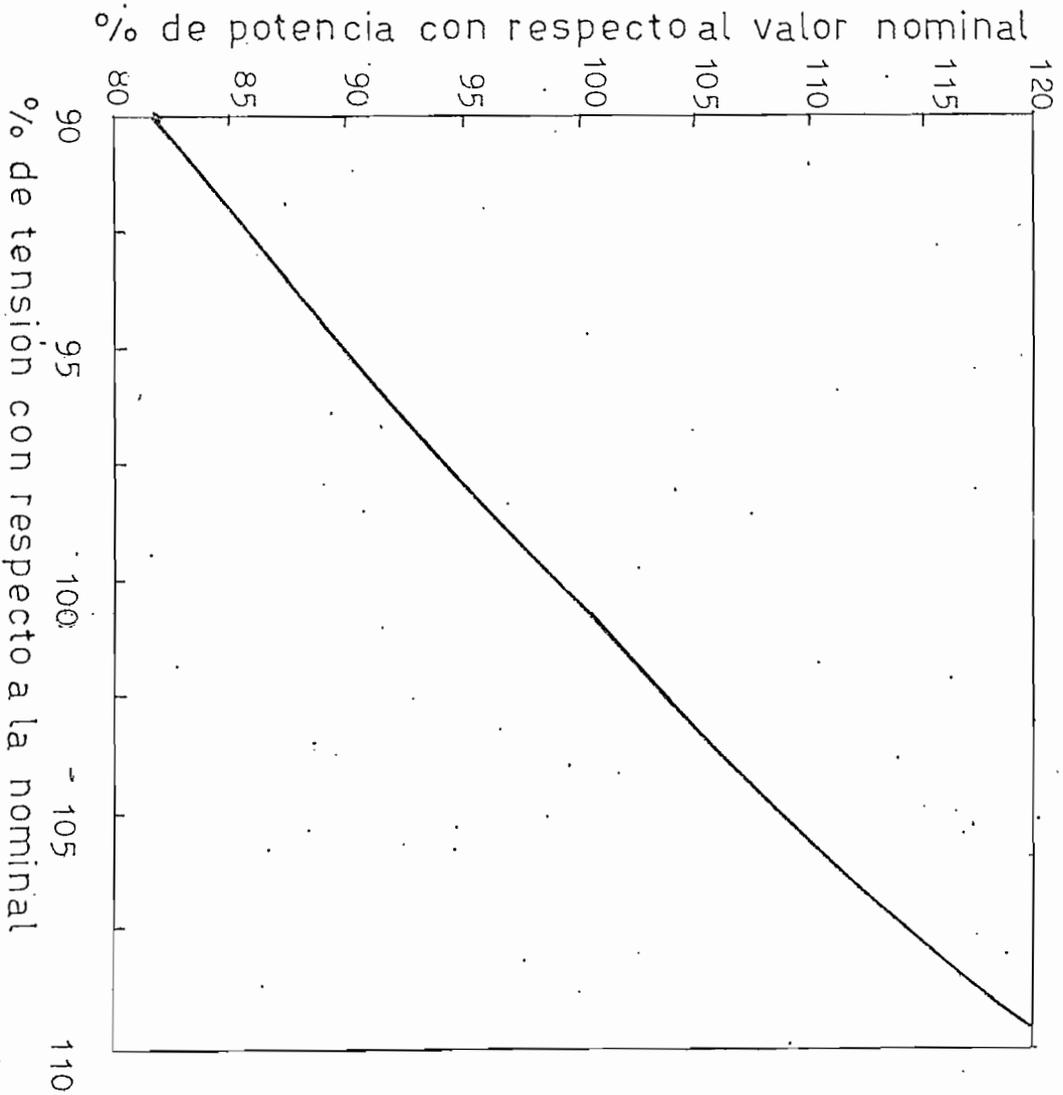


FIGURA 1.3

EFEECTO DE LA VARIACION DE LA TENSION EN LOS  
EQUIPOS DE CALIBRACION ELECTRICAS

defecto en los aparatos electrónicos. La variación de la tensión afecta los filamentos de las válvulas electrónicas, que son los más sensibles a las variaciones de la tensión. Entre los aparatos electrónicos como radios y televisores que son de uso generalizado, una variación de la tensión afecta el volumen, brillo, imagen y vida media de estos aparatos.

Por lo que se ha analizado anteriormente se puede concluir que la tensión debe mantenerse dentro de los límites permisibles para que un sistema de distribución sea de buena calidad.

Para lograr este objetivo se utilizan equipos de regulación de la tensión situados estratégicamente dentro del sistema.

#### 1.2.2 Importancia económica.

Al tomar en cuenta la caída de tensión permisible en un sistema de distribución, siempre se deben considerar dos factores que son el costo y la calidad del servicio eléctrico.

Un sistema es más económico cuanto mayor sea la carga servida, pero en ese caso la calidad del servicio eléctrico tiende a ser deficiente.

Cuando la carga es menor, se mejora la calidad del servicio, incidiendo en el costo.

Una tensión insuficiente disminuye el consumo de energía, por tanto disminuye los ingresos de la empresa; una tensión excesiva puede destruir los equipos de los consumidores y de la empresa eléctrica.

La regulación de la tensión tiene como objetivo satisfacer las exigencias del usuario a un costo económico.

Los gastos fijos anuales de la empresa son independientes de la cantidad de energía vendida, pero a mayor número de kWh vendidos mayor será la incidencia en el costo de cada Kwh, por tanto es mayor la utilización del servicio eléctrico.

Al mejorar la regulación de la tensión, directamente aumenta la energía vendida por el mismo valor de carga conectada al sistema. 92

Una mala regulación causa molestias a los usuarios, predisponiéndolos en contra de la empresa.

Un factor de potencia bajo, disminuye la regulación de la tensión siendo este el motivo por el cual la empresa debe exigir a los clientes un pago adicional. ?

Una baja tensión causa una iluminación deficiente de calles y edificios, pudiendo provocar accidentes, vandalismos, etc.

## CAPITULO II

### USO DE CONDENSADORES

#### f. 2.1 Introducción.

El acelerado avance tecnológico de los últimos tiempos ha conducido en el dominio de la electricidad a un máximo aprovechamiento de los equipos y elementos de las redes de distribución de energía eléctrica, por tanto debe tenderse a corregir un bajo factor de potencia y por ende un bajo nivel de tensión.

En el presente capítulo se describe el uso de condensadores a lo largo de alimentadores de distribución, con el objeto de maximizar los beneficios técnicos resultantes de su instalación.

#### 2.2 Aplicación en distribución.

La energía a ser utilizada está constituida por: motores eléctricos, equipos de soldadura eléctrica, compresores, cierto tipo de hornos eléctricos, consumo residencial, comercial, etc. estas cargas pueden ser divididas en resistivas y reactivas. Las resistencias consumen potencia activa-watios, y las reactancias consumen potencia reactiva-vars; dado que los sistemas de distribución evolucionan en una forma casi continua, el análisis de las necesidades de po

tencia reactiva debe realizarse en forma periódica.

Para suplir la demanda de reactivos se utilizan condensadores en los sistemas de distribución.

Las consecuencias de las altas demandas de reactivos en un sistema de distribución puede manifestarse de varias formas:

-Los transformadores de la subestación pueden estar funcionando sobrecargados o en los límites de su capacidad térmica.

-Bajos factores de potencia, lo que causa un incremento innecesario de las pérdidas en el sistema.

-Caidas excesivas de tensión en las líneas de distribución.

La potencia reactiva influye en el control de la tensión, reducción de pérdidas de potencia y energía, y en el aprovechamiento óptimo de la capacidad de las subestaciones e instalaciones del sistema de distribución. Debe tomarse en cuenta que todos estos aspectos están íntimamente relacionados entre sí, por lo que el estudio preferente de uno de ellos obliga a tomar en cuenta a los demás.

La compensación de reactivos se hace por medio de condensadores estáticos o sincrónicos.

El empleo de condensadores puede hacerse a nivel de subestaciones o en alimentadores.

### 2.2.1 Uso de condensadores en subestaciones.

Los condensadores se usan en subestaciones de distribución en el

lado de alta o baja tensión.

Las causas por las cuales los condensadores son instalados en una subestación de distribución son:

- Cuando la subestación alimenta una gran carga directamente.
- Si no se puede instalar mas capacitores en derivación fijos en las líneas, debido a niveles de tensión altos en momentos de carga ligera.
- Cuando se desea tener en un solo sitio centros de operación directa sobre los condensadores, pudiendo maniobrarlos manual o automáticamente de acuerdo con los diferentes períodos de carga del sistema.

#### 2.2.2 Uso de condensadores en alimentadores.

Se usa condensadores en los alimentadores de un sistema de distribución debido a que de esta manera se pueden localizar mas cerca de los centros de carga.

Debido a que el costo por KVAR instalado tiende a aumentar conforme se acerca mas hacia la carga, solo en algunos casos se justifica el instalar los condensadores en los alimentadores secundarios, por lo que la tendencia actual es ubicarlos en los circuitos primarios (referencia 17).

*No document*

#### 2.3 Uso de capacitores en derivación.

Se usan capacitores en derivación en alimentadores primarios de un sistema de distribución para obtener beneficios por:

- Reducción de pérdidas de potencia y energía.
- Incremento de los niveles de tensión.
- Incremento de la capacidad del sistema.
- Mejor factor de potencia.

### 2.3.1 Reducción de pérdidas de potencia y energía.

Hay varios tipos de cargas conectadas a un alimentador como son: cargas uniformemente distribuidas, cargas concentradas, cargas no uniformes, etc.

Para el análisis de la pérdidas de potencia y energía supondremos un alimentador con cargas uniformemente distribuidas y resistencia uniforme, como se ilustra en la figura 2.1

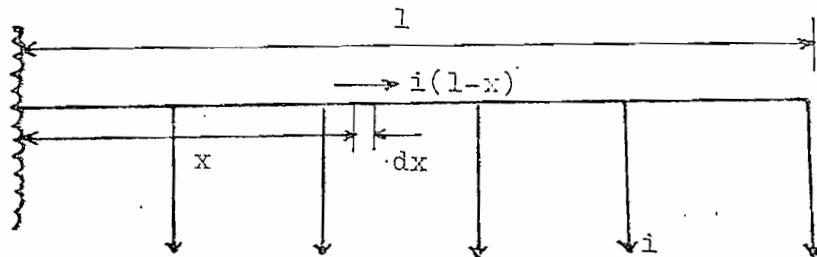


FIGURA 2.1

Diagrama unifilar de un alimentador trifásico con carga uniformemente distribuida y resistencia uniforme.

Considerando el diagrama unifilar del circuito trifásico de un alimentador el cálculo de las pérdidas es el siguiente:

$$L_{3\phi} = 3 \cdot r \cdot x \cdot i^2 (1-x)^2$$

Las pérdidas en el elemento de longitud dx es:

$$dL_{3\phi} = 3 \cdot r \cdot dx \cdot i^2 (1-x)^2$$

y las pérdidas totales son:

$$\begin{aligned} L_{3\phi} &= 3 \cdot r \cdot i^2 \int_0^1 (1-x)^2 \cdot dx \\ &= r \cdot i^2 \cdot 1^3 \quad , \quad (a) \\ &= R_t \cdot I_t^2 \text{ wátios.} \end{aligned}$$

Si la carga cumple un ciclo, las pérdidas por energía totales son:

$$\begin{aligned} E_{3\phi} &= \int_0^T L_{3\phi} dt \\ &= R_t \int_0^T I_t^2 dt \end{aligned}$$

$$= R_t \cdot I_t \cdot \max^2 \cdot L_f \cdot T$$

$$E_{3\phi} = 8.76 \quad R_t \cdot I_t \max^2 \cdot L_f$$

Cuando instalamos un banco de capacitores como se muestra en la figura 2.2, las pérdidas son modificadas:

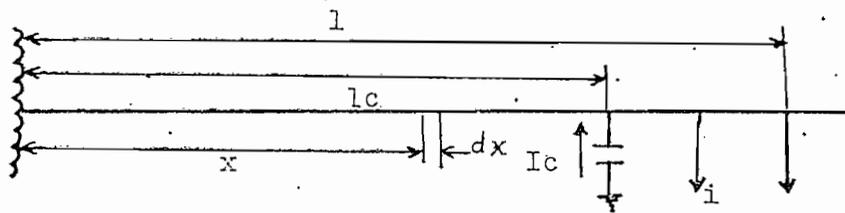


FIGURA 2:2

Instalación de un banco de capacitores en un alimenta\_ dor.

$$L_{3\phi} = 3.r \int_0^{lc} [i^2(1-x)^2 - 2.i_2.ic(1-x) + ic^2] dx + \int_{lc}^1 i^2(1-x)^2 dx$$

$$= 3.r \left[ \frac{1}{3} i^2 + (lc^2 - 2.lc.l)i_2.ic + ic^2.lc \right] \text{ vatios. } (b)$$

Restando la ecuación a menos la ecuación b, la reducción de per didas viene a ser:

$$\Delta L_{3\phi} = [3.r(2.lc.l - lc^2) i_2.ic - 3.r.ic^2.lc] / 1000 \text{ Kw } (1)$$

Si la reducción de per didas es integrado con respecto al tienpo se obtiene la reducción de per didas por energía.

$$\Delta E_{3\phi} = \int_0^T \Delta L_{3\phi} dt$$

$$= [3.r(2.lc.l - lc^2) ic.i_2 \text{ max. Lf. T} - 3.r.lc.ic^2.T] / 1000 \text{ (2)}$$

En donde:

$i$  = corriente por unidad de longitud de la carga unifor mente distribuida.

$i_2$  = componente reactiva de la corriente.

$ic$  = corriente reactiva que aporta el banco de capacitores

$L_f$  = Factor de la corriente reactiva.

$$L_f = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{I_2 dt}{I_2 \text{ max}}$$

$$= \frac{I. \text{ reactiva media}}{I. \text{ reactiva máxima}}$$

(3)

$l$  = longitud del alimentador.

$l_c$  = longitud del alimentador desde la subestación hasta el punto en donde está conectado el banco de capacitores.

$r$  = resistencia del alimentador en ohms por unidad de longitud.

$T$  = tiempo en horas en que los capacitores están conectados a carga.

### 2.3.2 Incremento de los niveles de tensión.

De la figura 2.3

se deduce que la caída de tensión en un sistema de distribución es :

$$E-V = I_p.R + (I_q - I_c)X$$

$$E-V = \frac{P}{V}R + \frac{(Q_q - Q_c)}{V}X$$

En circuitos de distribución de tensiones medias o elevadas se puede despreciar la componente  $R$  de la impedancia, o sea se considera únicamente el efecto del capacitor, la ecuación quedaría modificada por la siguiente expresión:

$$V-E = \frac{Q_c}{V}X$$

Dividiendo ambos términos para  $V$ :  $(V-E)/V = Q_c.X/V^2$

Luego el aumento por centual de tensión puede ser expresado por:

$$\Delta V\% = \frac{Q_c \cdot x \cdot l}{10(KV)^2} \quad (4)$$

Donde:

$Q_c$  = cantidad de Kilovars trifásicos en capacitores instalados.

$l$  = longitud del alimentador

$x$  = reactancia del alimentador en ohms por unidad de longitud.

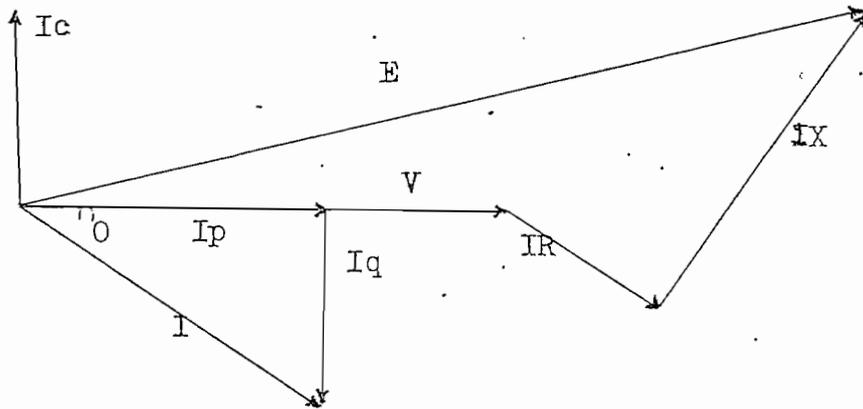
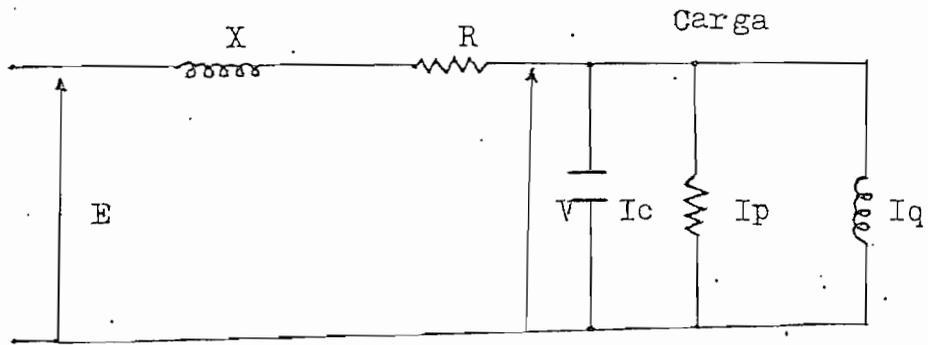


FIGURA 2.3

DIAGRAMA VECTORIAL DE LA TENSION Y CORRIENTE  
 DE UN ALIMENTADOR CON CAPACITORES INSTALADOS EN EL

KV = tensión de línea en Kilovoltios.

Como se nota para una determinada línea el aumento por centual de tensión es directamente proporcional a los KVAR instalados. El transformador de la subestación también experimentará un aumento de tensión, el cual es independiente de la carga y puede ser determinado por la fórmula: (Referencia 2 )

$$\Delta V_t \% = \frac{Q_c}{KVAt} X_t \quad (5)$$

En donde:

$V_t$  = aumento por centual de tensión en el transformador.

KVAt = potencia nominal del transformador.

$X_t$  = reactancia por centual del transformador.

Por lo que queda expuesto podemos disminuir la caída de tensión en la línea, la que está dada por la fórmula: (referencia 7))

$$\Delta V_l \% = \frac{KVA \cdot l (r \cdot \cos \theta + x \cdot \sen \theta)}{10(KV)^2} \quad (6)$$

En donde:

$V_l$  % = caída por centual de tensión en la línea.

$l$  = longitud de la línea.

$r$  = resistencia del conductor en ohms por unidad de longitud.

$x$  = reactancia del conductor en ohms por unidad de longitud.

$\theta$  = ángulo de fase.

KV = tensión entre fases en Kilovoltios.

KVA = carga aparente de la línea.

### 2.3.2.1 Cuidados de utilización.

Cuando se utiliza capacitores en derivación en alimentadores primarios deben ser adecuadamente conectados o desconectados al sistema de distribución, en condiciones de máxima o mínima carga, ya que con una carga ligera se podría llegar a tener una tensión mayor que la nominal.

Para eliminar este problema se utilizan bancos de capacitores desconectables, los cuales están planificados para entrar o salir de operación del sistema, ya sea manual o automáticamente.

Su utilización se ve impulsada cuando:

- Existe una demanda variable de potencia reactiva en el sistema.
- Se trata de minimizar las pérdidas y trabajar con la máxima capacidad instalada en el sistema.
- Se desea mantener la tensión dentro de los niveles adecuados, ya sea en condiciones de máxima o mínima carga.

Si la tensión máxima permisible ya ha sido alcanzada en momentos de mínima demanda, cualquier cantidad adicional en

KVAR instalada debe ser desconectada.

Si hacemos consideraciones necesarias para mantener la tensión

dentro de los límites permisibles, se instalan capacitores fijos.

### 2.3.3 Incremento de la capacidad del sistema.

En el diagrama vectorial de la figura 2.4 representamos un sistema compuesto por una potencia aparente  $S = P + jQ$ , con un factor de potencia  $\theta$  (punto 1). Cuando instalamos una cierta cantidad de potencia reactiva  $Q_c$  en capacitores, el sistema pasará a tener una potencia  $S' = P + jQ'$ , con un factor de potencia  $\theta'$ , por tanto  $Q' = Q - Q_c$  (punto 2), luego la capacidad de alimentación pasa a ser  $S'$  menor a  $S$ , entonces podrá el sistema aprovechar el incremento de capacidades debido a la instalación de capacitores, por tanto es posible atender una demanda adicional  $\Delta P$ , con el mismo factor de potencia  $\theta$  (punto 3 de la fig. 2.4), lo que representa grandes rendimientos para la empresa.

De la fig. 2.4 se deduce el incremento de potencia activa

$$\Delta P = \Delta S \cdot \cos\theta$$

$$\Delta S = S - S'$$

$$= \frac{P}{\cos\theta} - \frac{P}{\cos\theta'}$$

$$\Delta P = P(1 - \cos\theta / \cos\theta') \quad (7)$$



### 2.3.4 Mejoras en el factor de potencia.

Al instalar capacitores se mejora el factor de potencia, lo que es muy importante sobre todo en las industrias, cuando éste es bajo hay un consumo elevado de corriente reactiva por parte de la carga, por lo que hay pérdidas excesivas en los circuitos de distribución.

De la fig. 2.4 se obtiene el factor de potencia mejorado debido a la instalación de capacitores.

$$Q_c = Q - Q'$$

$$Q = P \cdot \operatorname{tg} \theta$$

$$Q' = P \cdot \operatorname{tg} \theta'$$

Luego:

$$Q_c = P(\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg} \theta') \quad (8)$$

Si

$$\operatorname{fp}' = \cos \theta'$$

$$\operatorname{tg} \theta' = \frac{\operatorname{sen} \theta'}{\cos \theta'}$$

De la ecuación 8 se obtiene el valor del nuevo factor de potencia:

$$\operatorname{fp}' = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{1 - \operatorname{fp}^2}{\operatorname{fp}} - \frac{Q_c}{P} \right)^2}} \quad (9)$$

En donde:

$Q_c =$  KVAR de los capacitores instalados.

$P =$  potencia activa de la carga en Kw.

$\operatorname{fp} =$  factor de potencia inicial.

$fp^*$  = factor de potencia final.

\* 2.4 Uso de capacitores en serie.

\* 2.4.1 Ventajas.

El uso de capacitores en serie es mas eficaz cuanto mayor sea el desfase entre los vectores característicos de tensión y corriente, como se muestra en la figura 2.5.

El uso de capacitores en serie se justifica en razón de que la regulación de la tensión se realiza en forma automática, y el aumento de la tensión es mas elevado cuando es mayor es el factor de compensación "K" elegido, siendo K el cociente entre la reactancia Xc que se conecta a la línea, con respecto a la reactancia de la línea Xl; o sea, si la caída de tensión en un circuito viene dada por:

$$\Delta V = I \cdot R_l \cdot \cos\theta + I \cdot X_l \cdot \sen\theta \quad (10)$$

Si en el circuito conectamos capacitores en serie, equivale a introducir una reactancia capacitiva Xc, el efecto se observa en la siguiente ecuación:

$$\Delta V = I \cdot R_l \cdot \cos\theta + I(X_l - X_c)\sen\theta \quad (11)$$

En donde:

- I = corriente de línea.
- Rl = resistencia de la línea.
- Xl = reactancia de la línea.

Si:

$X_c/X_l = 1$  la caída de tensión se reduce al valor de:

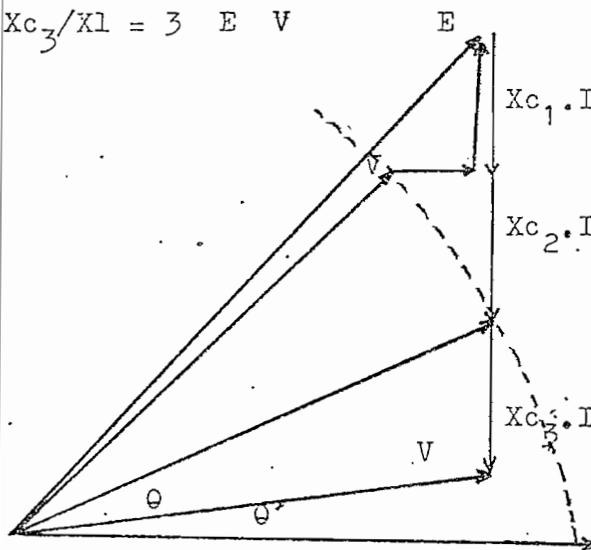
$$\Delta V = I \cdot R_l \cdot \cos\theta \quad (12)$$

- \* Otra ventaja del uso de los capacitores en serie es la regulación automática y continua del factor de potencia en todos los estados de carga, este tipo de instalación es recomendado cuando el factor de potencia propio de la línea tiene un valor bajo debido a su carácter fuertemente inductivo, o cuando se trate de líneas aéreas de gran longitud.
- ? Resultan también aptos cuando se trata de líneas paralelas o circuitos en anillo que alimentan en un punto intermedio o final a una carga común, siendo las impedancias de las líneas distintas, distintas longitudes, diferentes materiales de los conductores utilizados, etc. Es posible lograr una conexión en paralelo, modificando con la instalación de los capacitores en serie las constantes de la línea de modo de lograr una semejansa de impedancia, que permitan similares tensiones de llegada (referencia 10 )
- \* Los capacitores en serie son particularmente útiles en ciertos circuitos radiales, cuando se quiere contrarrestar los efectos titilantes (lámp. Flicker), producidos como consecuencia de cambios bruscos de carga, por ejemplo, frecuentes arranques de motores eléctricos.

$$X_{c1}/X_l = 1 \quad E \quad V$$

$$X_{c2}/X_l = 2 \quad E \quad V$$

$$X_{c3}/X_l = 3 \quad E \quad V$$



$E$  = tensión de salida.

$V$  = tensión de recepción.

$R_l$  = resistencia de la línea.

$X_l$  = reactancia de la línea.

$X_c$  = reactancia capacitiva del capacitor en serie.

$I$  = intensidad total de la línea.

$\theta$  = factor de potencia inicial.

$\theta'$  = factor de potencia corregido

FIGURA 2.5

Diagrama de los vectores de tensión y corriente cuando se instalan capacitores en serie.

#### ✕ 2.4.2 Desventajas.

El uso de capacitores en serie ofrece serios problemas en cuanto a su protección y operación se refiere, ya que en casos de cortocircuitos los condensadores se encuentran sometidos a fuertes sobretensiones, que solamente podrían ser soportados por los capacitores por un brevísimo tiempo, ya que en caso contrario se corre el riesgo de que se deteriore su aislación, o se destruya totalmente. Por este motivo se necesita una protección especial para los capacitores conectados en serie.

También se evita su uso debido a la posibilidad siempre presente de ferorrresonancia, se presentan en el transformador corrientes de excitación distorsionadas y excesivamente grandes. Su aplicación requiere por tanto una cuidadosa consideración de los principios de ingeniería involucrados.

Existe poca experiencia en cuanto al uso de los capacitores conectados en serie en sistemas de distribución.

2.5 Uso de condensadores síncronos.

Hace algunos años cuando se deseaba compensar reactivos a las cargas se usaba preferencialmente condensadores síncronos, esto era debido a que éstas máquinas se conocían mucho más que los capacitores; el continuo progreso técnico y sus decrecientes precios han sido factores decisivos para que los condensadores síncronos se utilicen en menor escala.

Sin embargo se debe analizar los factores que determinen el uso de condensadores estáticos o síncronos, como son:

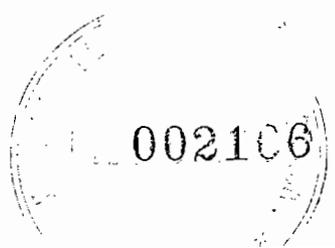
- X - Los costos de operación, mantenimiento y equipo adicional es mayor en los condensadores síncronos.
- Los condensadores síncronos tienen órganos sometidos a desgaste, además necesitan vigilancia en su operación; se encuentra dificultad en su instalación, no es posible instalarlos en cualquier local, ni tampoco a la intemperie.
- Las pérdidas por potencia son menores en los capacitores.
- Un condensador síncrono es capaz de suministrar vars en a

delanto al sistema y operar como reactor absorbiendo vars de él.

-La finura de los vars suministrados por los condensadores síncronos no puede ser alcanzada por los capacitores, a menos que se usen capacitores con un número de pasos desconectables muy grande.

-En cuanto a su confiabilidad se refiere: una falla interna en cualquier unidad del banco de capacitores, hará que salte el fusible de protección de esa unidad, sin arriesgar el funcionamiento total del banco. En el caso de los condensadores síncronos los vars que se arriesgan en caso de falla son mayores. La probabilidad de que ocurra una falla en el banco de capacitores es mucho menor que la que pueda ocurrir en los condensadores síncronos.

Finalmente se puede concluir que si no se desea un fino control de los vars suministrados, o vars en atraso, es mas conveniente utilizar capacitores conectados en paralelo.



## CAPITULO III

### ANALISIS ECONOMICO DEL USO DE CAPACITORES

#### 3.1 Introducción.

El presente estudio está relacionado con la deter-  
minación de los beneficios económicos obtenidos al instalar ca-  
pacitores en alimentadores primarios de distribución.

Un análisis económico de esta naturaleza envuelve muchos pro-  
blemas, toda vez que una empresa difiere de otra, y dentro de  
una misma empresa un sistema es diferente a otro, pudiendo tam  
bién decirse que un circuito se diferencia de otro; esto ocurre  
debido al gran número de párametros y de combinaciones involu-  
cradas, por lo que se efectuará un análisis económico general,  
que conducirá a un uso adecuado de los capacitores para cada  
caso particular.

#### \* 3.2 Ventajas económicas.

Las ventajas económicas de la instalación  
de capacitores están relacionadas de un modo general con el  
incremento de la capacidad del sistema, reducción de pérdidas  
en los circuitos y aumentos de rendimientos debido al incre-  
mento de la tensión.

##### 3.2.1 Incremento de la capacidad del sistema.

Este tipo de be<sup>ventajas</sup>  
neficio se debe a la eliminación o reducción de las nuevas

inversiones en equipos o refuerzos de líneas, para atender tanto la conexión de nuevas cargas como el crecimiento vegetativo del consumo.

Como se analizó en el capítulo anterior, al instalar una cantidad  $Q_c$  en capacitores, podemos obtener una potencia aparente adicional  $\Delta S$ , y por tanto un incremento en potencia activa  $\Delta P$ , lo cual representa grandes rendimientos para la empresa. Por otra parte el costo de la instalación de los capacitores representa una inversión a ser amortizada, por lo que se debe justificar su instalación desde el punto de vista económico. Para establecer los beneficios económicos utilizamos la fórmula 7:

$$\Delta P = P \left( 1 - \frac{\cos\theta}{\cos\theta'} \right)$$

Para transformar estos Kilovatios de potencia activa incrementada a un valor monetario, debemos conocer el costo del Kw en el punto considerado, al que se llamará "K2".

Por tanto el beneficio obtenido al incrementarse la capacidad del sistema es:

$$B1 = K2 \cdot \Delta P$$

Luego 
$$B1 = K2 \cdot P \cdot \left( 1 - \frac{\cos\theta}{\cos\theta'} \right) \quad (13)$$

### X 3.2.2 Reducción de pérdidas.

La reducción de pérdidas de potencia y energía lleva a una reducción de los costos de operación.

Si los factores que reducen estas pérdidas reducidas a un fac

tor económico común son llamados "K1" y "K2", entonces el beneficio económico obtenido es:

$$B2 = K1 \cdot E_{30} + K2 \cdot L_{30} \quad (14)$$

De las fórmulas 1 y 2 se obtiene la ecuación de los beneficios

$$B2 = \frac{3 \cdot r}{1000} [Ic \cdot i_2 (2 \cdot lc \cdot l - lc^2) Y - lc \cdot Ic^2 \cdot Z] \quad (15)$$

En donde:

$$Y = K1 \cdot Lf \cdot T + K2 \quad (16)$$

$$Z = K1 \cdot T + K2 \quad (17)$$

Para obtener los valores más óptimos de la ubicación y capacidad del banco de capacitores, efectuamos la primera derivada de B2 con respecto a las dos variables independientes "lc", "Ic", e igualamos a cero.

$$dB2/dIc = 0 = i_2 (2 \cdot lc \cdot l - lc^2) Y - 2 \cdot lc \cdot Ic \cdot Z \quad c$$

$$dB2/dlc = 0 = Ic \cdot i_2 (2 \cdot l - 2 \cdot lc) Y - Ic^2 \cdot Z \quad d$$

Resolviendo simultáneamente c y d se obtiene:

$$lc = 2l/3 \quad (18)$$

$$Ic = \frac{2 \cdot Y}{3 \cdot Z} l \cdot i_2 \max$$

$$Ic = \frac{2 \cdot Y}{3 \cdot Z} I_2 \max. \quad (19)$$

Para obtener los máximos beneficios por reducción de pérdidas de potencia y energía reemplazamos los valores obtenidos de lc y Ic en la ecuación 15 obteniendo:

$$B_2 \text{ óptimo} = \frac{8 \cdot y^2}{9 \cdot z} \cdot r \cdot l^3 \cdot I_2^2 \left( \frac{1}{1000} \right); \quad B_2 = 8 \cdot r \cdot l \cdot y^2 \cdot I_2^2 / 9 \cdot z \cdot 1000 \quad (20)$$

En donde:

$$B_2 = 8 \cdot r \cdot l \cdot (K_1 \cdot L \cdot T + K_2)^2 \cdot I_2^2 / 9 \cdot (K_1 \cdot T + K_2)$$

$K_1$  = costo unitario del Kwh de energía.

Si  $K_1 = 0$ , obtenemos el beneficio por reducción de pérdidas de potencia.

Si  $K_2 = 0$ , obtenemos el beneficio por reducción de pérdidas de energía.

Vuelve a tomarse en cuenta  $K_2$ , debido a que si suponemos que la carga del sistema está dividida en dos partes económicamente: una la carga de los consumidores que es traducida en rendimientos económicos, y la otra, las pérdidas de potencia y energía en los circuitos del sistema de distribución.

Como se vió, anteriormente el parámetro  $K_2$  es definido como el costo anual del Kw de capacidad instalado en el sistema, atrás de punto de la instalación de los capacitores, o sea los Kw capaces de producir rendimientos.

Se debe imaginar que todas las pérdidas atrás de los capacitores están concentradas y representando una carga no rentable, entonces el valor efectivo de  $K_2$  debería aumentar en un pequeño valor, que representaría el costo de suprimir estas pérdidas.

### \* 3.2.3 Aumento de rendimientos debido al incremento de la tensión:

Los capacitores instalados en un sistema de distribución aumentan el nivel de tensión, lo que hace que los ingresos por concepto de los Kwh consumidos por las

cargas sean mas elevados.

Los Kwh consumidos son una función de la tensión al cuadrado como se analiza a continuación:

$$P = S \cdot \cos\theta$$

$$S = V^2/Z$$

$$Be = K1 \cdot fc \cdot T \cdot S \cdot \cos\theta \quad (21)$$

$$Be1 = K1 \cdot fc \cdot T \cdot \frac{V1^2}{Z} \cdot \cos\theta \quad (22)$$

En donde:

Be1 = costo de la energía vendida antes de instalar los capacitores.

fc = factor de carga medio.

T = número de horas considerado.

V = tensión entre fases en condiciones iniciales.

Z = impedancia de la carga.

$\cos \theta$  = factor de potencia de la carga.

K1 = costo del Kwh.

Si la tensión pasa a un valor V2, la energía vendida es:

$$Be2 = K1 \cdot fc \cdot T \cdot \frac{V2^2}{Z} \cdot \cos\theta \quad (23)$$

Dividiendo la ecuación 23 para la 22 se obtiene:

$$Be2/Be1 = (V2/V1)^2 \quad (24)$$

Se concluye entonces que la energía vendida varía con el cuadrado de la tensión incrementada, pero en la práctica se observa que únicamente las cargas resistivas varía el consumo con la relación anterior.

con la relación anterior.

La variación del consumo en los aparatos no, termostáticamente controlados y en los motores eléctricos de inducción, no varía en una relación cuadrática sino en una relación levemente superior a uno.

Por lo que se acostumbra usar en la práctica una relación conciliatoria (referencia 15) :

$$Be_2/Be_1 = (v_2/v_1)^{1.6} \quad (25)$$

La tabla 3.1 muestra la variación del consumo de acuerdo con las variaciones de la tensión.

### 3.2.3.1 Cálculo de los aumentos de rendimientos por energía

$$Be = Be_2 - Be_1$$

Si:

$$Be_2 = (V_2/V_1)^{1.6} Be_1$$

Por tanto:

$$Be = Be_1 [(V_2/V_1)^{1.6} - 1]$$

$$Be = K_1 \cdot f.c.T.P [(V_2/V_1)^{1.6} - 1] \quad (26)$$

### 3.2.3.2 Cálculo de los aumentos de rendimientos por demanda.

$$B_p = K_2 \cdot S \cdot \cos \theta$$

$$= K_2 \cdot \frac{V^2}{Z} \cos \theta$$

Donde :

$V_2/V_1$	$Be_2/Be_1$
1.00	1.00
1.05	1.08
1.10	1.16
1.15	1.25
1.20	1.34
1.25	1.43
1.30	1.52
1.35	1.62
1.40	1.71
1.45	1.81
1.50	1.91

$V_2/V_1$	$Be_2/Be_1$
1.55	2.02
1.60	2.12
1.65	2.23
1.70	2.34
1.75	2.45
1.80	2.56
1.85	2.68
1.90	2.79
1.95	2.91
2.00	3.03

TABLA 3.1

VARIACION DEL CONSUMO DE ACUERDO CON LAS VARIACIONES DE TENSION.

233247

$B_p$  = costo de la demanda en dólares.

$K_2$  = costo de la demanda en dólares por Kilovatio

Siguiendo un procedimiento análogo al anterior:

$$B_{p2}/B_{p1} = (V_2/V_1)^{1.6} \quad (27)$$

Luego el aumento de rendimientos debido a la demanda es:

$$B_p = B_{p2} - B_{p1}$$

Si:

$$B_{p2} = B_{p1}(V_2/V_1)^{1.6}$$

$$B_p = B_{p1} [(V_2/V_1)^{1.6} - 1]$$

$$B_p = K_2.P [(V_2/V_1)^{1.6} - 1] \quad (28)$$

---El beneficio global por energía y demanda es:

$$B_3 = K_3.P [(V_2/V_1)^{1.6} - 1] \quad (29) \quad \text{En donde } K_3 = K_1.f.c.T + K_2$$

### 3.3 Evaluación de costos de instalación.

Para poder determinar el costo anual de instalación de una cierta cantidad de potencia reactiva  $Q_c$ , necesitamos obtener un factor que proporcione el costo anual unitario por KVAR, al que denominaremos " $K_q$ ", y para determinarlo se utiliza la fórmula de recuperación de capital, que es el pago de una (el pago de una) cantidad de dinero con una anualidad, o sea, se recupera el dinero invertido y también los intereses.

Luego:

$$K_q = \frac{C.i (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (30)$$

En donde:

C = inversión total por KVAR instalado, incluido: costo del equipo, mano de obra, mantenimiento, etc.

i = interés.

n = período de tiempo para recuperar las inversiones (generalmente la vida útil del equipo)

Si se supone:

C = 10 dólares por KVAR

i = 10 %

n = 20 años.

$$Kq = \frac{10 \times 0.1 (1 + 0.1)^{20}}{(1 + 0.1)^{20} - 1}$$

$$Kq = 1.175 \text{ \$/KVAR}$$

Luego los costos totales de instalación son: ~~Kq.Qc~~

### 3.4. Relación BENEFICIO-COSTO.

Para obtener la relación beneficio-costos B/D, debemos obtener todos los beneficios obtenidos por incremento de la capacidad del sistema, reducción de pérdidas de potencia y energía e incremento de los niveles de tensión, y este total se divide para el costo total de la instalación de los capacitores.

Por tanto:

Incremento de la capacidad del sistema:

$$B1 = K2 \cdot P (1 - \cos\theta / \cos\theta')$$

Reducción de pérdidas de potencia y energía:

$$B2 = \frac{8 \cdot r \cdot V^2 \cdot l^3 \cdot i_2}{9 \cdot Z \cdot 1000}$$

Incremento de los niveles de tensión:

$$B3 = K3 P [(V2/V1)^{1.6} - 1]$$

El beneficio global es:

$$B = B1 + B2 + B3$$

Luego la relación beneficio-costo es:

$$\frac{B}{D} = \frac{B1 + B2 + B3}{Kq \cdot Qc} \quad (31)$$

## CAPITULO IV

### USO DE REGULADORES DE TENSION

#### 4.1 Introducción.

Un factor fundamental del servicio eléctrico es el mantenimiento de la tensión dentro de los niveles aceptables, lo que es un incentivo para que el consumidor utilice una mayor cantidad de energía eléctrica, para un mismo valor de carga conectada al sistema.

Dependiendo de las condiciones de los circuitos y de las cargas a ellos conectadas, se puede utilizar reguladores de tensión en alimentadores de distribución.

#### 4.2 Generalidades.

Un regulador de tensión es un auto-transformador regulable automáticamente, posee dos bobinados, que de acuerdo con la tensión deseada excitará un control electrónico, este a su vez colocará el nivel de tensión através del segundo enrollamiento, o sea saldrá hacia la carga una tensión regulada.

##### 4.2.1 Tipos de reguladores de tensión.

Hay dos tipos de reguladores de tensión: inducción y paso.

##### 4.2.1.1 Reguladores de tensión tipo inducción.

Estos fueron los primeros tipos de reguladores de tensión automáticos usados en sistemas de distribución, su utilización ha dis-

minuido debido a que su costo es mayor que los tipo paso.

Su construcción se asemeja a un motor de inducción, el cambio de tensión se efectúa por la rotación del rotor, que es el bobinado secundario o en paralelo, y el estator o bobinado serie que va instalado en la línea, hacia la carga. Los cambios de tensión se deben a los cambios de flujo magnético en el bobinado secundario.

Su rango de regulación es de  $\pm 10\%$  y reduciendo este rango a  $\pm 5\%$ , se permite operar al regulador con un 200% de su potencia nominal.

Este tipo de reguladores pueden ser monofásicos y trifásicos: los monofásicos regula los circuitos monofásicos, y si se utiliza un banco de tres reguladores, se puede regular un circuito trifásico.

Hay dos clases de reguladores de tensión tipo inducción trifásicos: el de núcleo simple, que tiene un enrollado por cada fase en el rotor y en el estator.

El tipo triplex que consta de tres reguladores monofásicos acoplados mecánicamente entre sí.

#### 4.2.1.2 Regulador de tensión tipo paso.

Es esencialmente un autotransformador, tiene un bobinado primario de excitación, conectado en paralelo, y un bobinado conectado en serie con la línea.

Los taps del bobinado serie están conectados a un mecanismo que cambia los taps automáticamente, tienen un rango de regulación de  $\pm 10\%$ .

Los reguladores modernos tienen 32 o 16 pasos, siendo cada paso de  $5/8\%$  o de  $11/4\%$  de paso respectivamente.

po estación y el tipo distribución.

Los tipo estación son trifásicos o monofásicos, se los instala en subestaciones generalmente en las barras.

Los tipo distribución son usualmente llamados reguladores de tensión de los alimentadores de distribución, son únicamente monofá sicos.

Cuando estos reguladores son operados con un rango de regulación reducido su capacidad puede ser incrementada, como se muestra en la tabla 4.1

Rango de regulación	Capacidad incrementada	
	Monofásicos	Trifásicos
$\pm 10\%$	100%	100%
$\pm 8.75\%$	110%	108%
$\pm 7.50\%$	120%	115%
$\pm 6.25\%$	135%	120%
$\pm 5\%$	160%	130%

TABLA 4.1.- Incremento de la capacidad del regulador al re ducir su rango de regulación.

#### 4.2.2 Aplicación de reguladores.

Tienen dos aplicaciones fundamen tales: control de la tensión a la salida de la subestación y corrección de las excesivas variaciones de tensión a lo largo de los alimentadores de distribución.

##### 4.2.2.1 Aplicación de reguladores en subestaciones.

La regulación de la tensión en las subestaciones generalmente se efec túa por medio del cambiador de taps bajo carga del transforma

dor; en casos especiales es posible utilizar reguladores de tensión tipo estación.

Actualmente la carga predominante servida por la subestación de termina el uso de reguladores ya sea monofásicos o trifásicos.

#### 4.2.2.2 Aplicación de reguladores en alimentadores.

La capacidad térmica de los conductores y la economía de las pérdidas en las líneas limitan el número de reguladores en serie; usualmente en los alimentadores rurales su número es dos, a veces tres (ref.20)

La regulación en cada alimentador está en contraste con la regulación en las barras, en donde dos o más alimentadores son regulados con un solo banco de reguladores, la regulación requerida en cada alimentador es independiente de la regulación necesaria en otros alimentadores de una misma barra.

Los reguladores de tensión usados a lo largo de los alimentadores pueden ser usados en los sitios en que la caída de tensión se salga de los límites permisibles.

Es preferible instalar los reguladores de línea antes del punto a ser regulado, para poder tener un incremento de cargas futuras localizadas entre el regulador y el punto en donde se establece la tensión mínima.

Para localizar el regulador podemos valer nos de la figura 4.1 la cual muestra los perfiles de tensión obtenidos al variar la carga; la distancia desde la subestación hasta el regulador es expresada en fracciones de la longitud total del alimentador.

La distancia desde la subestación hasta el punto de instalación del regulador es aproximadamente un 30% de la longitud total del alimentador.

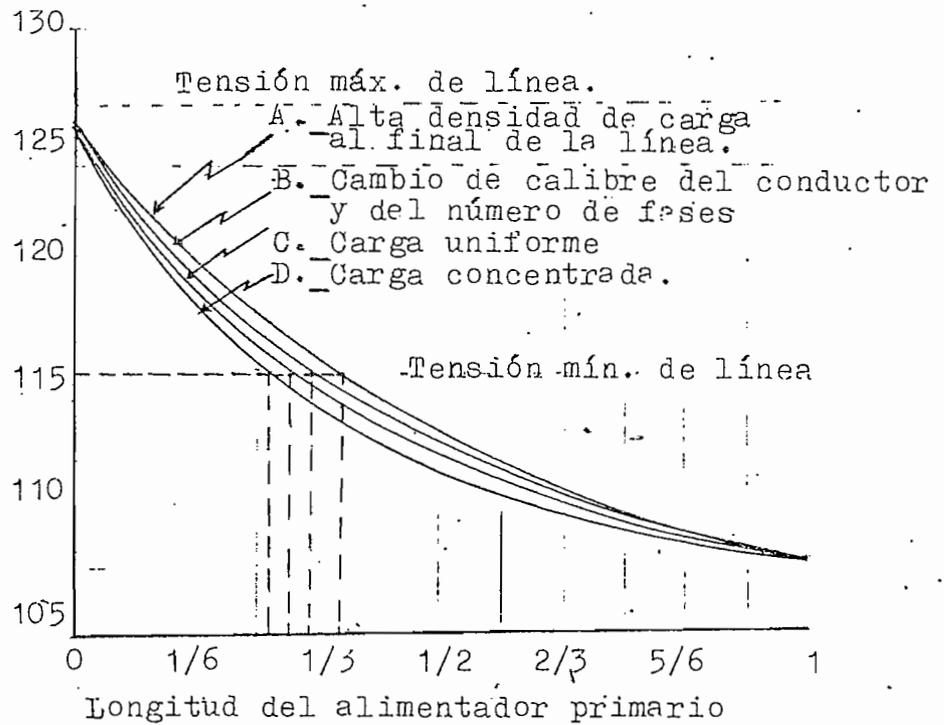
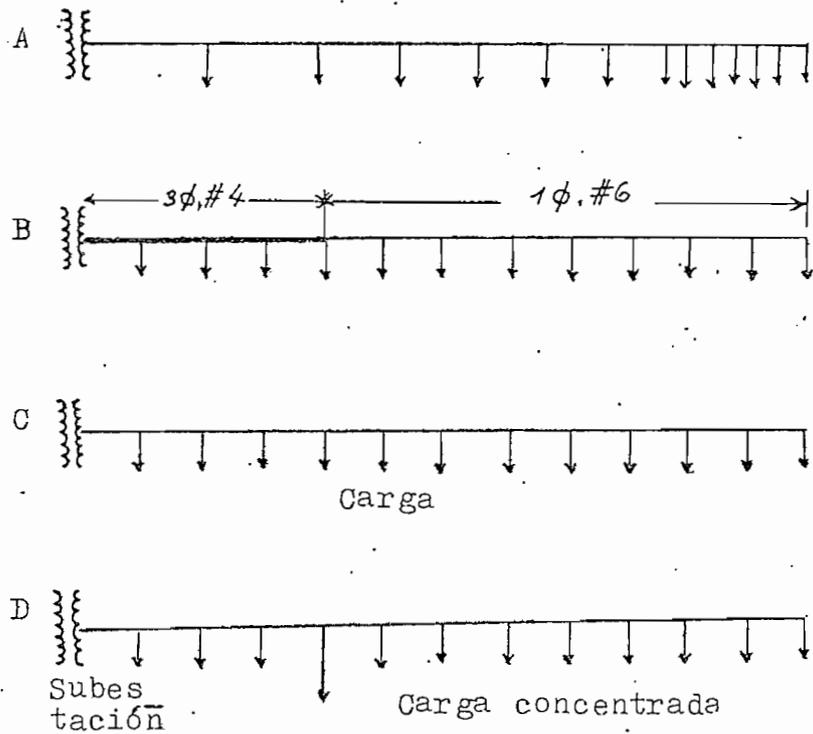


FIGURA 4.1

Ubicación del regulador en alimentadores de acuerdo con diferentes tipos de carga.

Como se ilustra en la figura 4.2, los reguladores son instalados tanto en circuitos monofásicos como trifásicos.

Si el porcentaje de regulación es:

$$\%R = \frac{|E_a'| - |E_a|}{|E_a|} \cdot 100 \quad (32)$$

En donde:

$E_a$  = tensión de entrada al regulador.

$E_a'$  = tensión de salida del regulador.

Luego los KVA nominales del regulador son:

$$KVA_{reg.} = \frac{\%R(KVA)}{100} \quad (33)$$

En donde:

KVA = potencia aparente de la carga.

$\%R$  = porcentaje del rango de regulación del regulador.

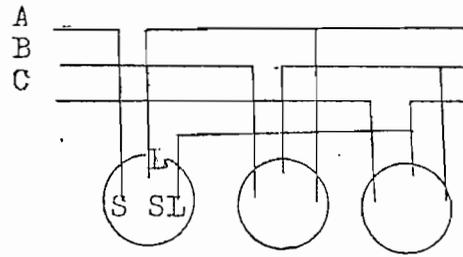
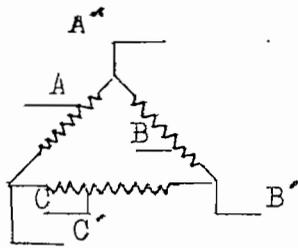
#### 4.3.1 Determinación de los KVA nominales de reguladores instalados en circuitos monofásicos.

Para determinar los KVA nominales podemos valernos de las siguientes ecuaciones.

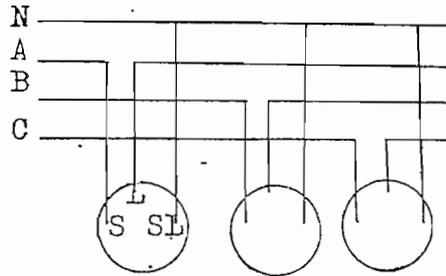
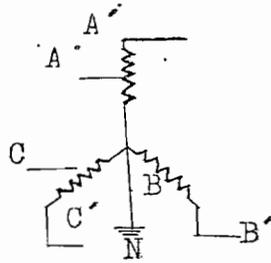
$$KVA_{reg.1\phi} = \frac{R\%}{100} (KVA_{1\phi}) \quad (34)$$

O también:

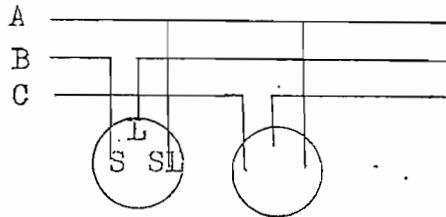
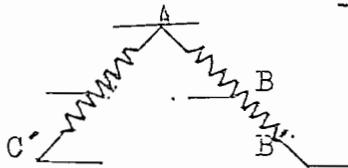
$$KVA_{reg.1\phi} = \frac{R\%}{100} KV_{L-T} \cdot I_L$$



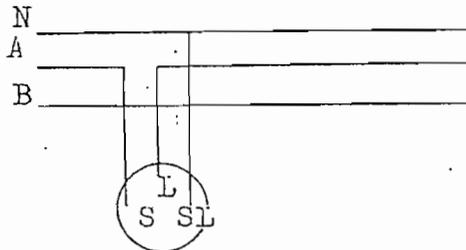
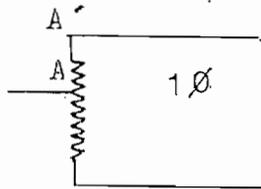
a DELTA CERRADO



b ESTRELLA



c DELTA ABIERTO



d REGULADOR MONOFASICO

FIGURA 4.2

DIFERENTES TIPOS DE INSTALACION DE REGULADORES

En donde:

$KVA_{1\phi}$  = carga del circuito monofásico.

$KV_{I.T}$  = tensión monofásica.

$I_L$  = corriente de línea.

4.3.2 Determinación de los KVA nominales de reguladores instalados en circuitos trifásicos.

Un circuito trifásico es regulado por medio de un regulador trifásico, un banco de tres reguladores monofásicos, o dos monofásicos.

Los reguladores pueden instalarse en circuitos trifásicos en estrella o conectados en delta.

4.3.2.1 Instalación de un regulador trifásico en un circuito en estrella-cuatro conductores.

Para este tipo de sistema el regulador es instalado en estrella, requiriendo conexión al neutro del sistema para que opere normalmente.

Los KVA nominales del regulador se los calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$KVA_{3\phi} = \frac{\%R}{100} (KVA_{carga}) \quad (35)$$

$$KVA_{3\phi} = \frac{\%R}{100} \sqrt{3} \cdot E \cdot I$$

En donde:

E = tensión de línea;

I = corriente de línea.

4.3.2.2 Instalación de un banco de tres reguladores monofásicos en un circuito en estrella-cuatro conductores.

Los KVA nominales se calculan por medio de la siguiente ecuación:

$$KVA_{\text{cada reg. } 1\phi} = I_L \cdot KV_{L-T} \cdot R\% / 100$$

O también:

$$KVA_{\text{reg. } 1\phi} = \frac{KVA_{\text{carga}} \cdot R\%}{3 \times 100} \quad (36)$$

4.3.2.3 Instalación de un banco de tres reguladores monofásicos en un circuito en delta cerrado.

Este tipo de instalación permite aumentar el rango de regulación en un 50% aproximadamente el rango de regulación del banco, con respecto al rango de regulación de cada regulador individual.

Para calcular los KVA nominales de cada regulador, al tener un incremento en el banco de un 50% de regulación, se utiliza la siguiente ecuación:

$$KVA_{\text{cada reg. } 1\phi} = \frac{R\% (KVA_{\text{carga}})}{150\sqrt{3}} \quad (37)$$

En donde:

R = 1.5 del tanto por ciento del rango de regulación de cada regulador individual.

La instalación de un banco de dos reguladores monofásicos en un circuito en delta abierto, como se analizará a continuación, es la de uso más generalizado.

4.3.2.4 Instalación de dos reguladores monofásicos en un circui  
to en delta abierto.

La regulación en las tres fases es obtenida como se ilustra en la figura 4.3, ya que si se tiene un igual incremento de tensión  $E_{CB}$  y  $E_{AB}$  a  $E'_{CB}$  y  $E'_{AB}$  respectivamente, lo cual causa un igual incremento de tensión de  $E_{CA}$  a  $E'_{CA}$ .

La ecuación para obtener los KVA nominales de cada regulador monofásico es:

$$\text{KVA}_{\text{cada reg. } 1\phi} = \frac{\%R \cdot |E| \cdot |I|}{100}$$

En donde :

$E$  = tensión entre fases.

$I$  = corriente de línea.

O también

$$\text{KVA}_{\text{cada reg. } 1\phi} = \frac{\%R(\text{KVA carga})}{100 \sqrt{3}} \quad (38)$$

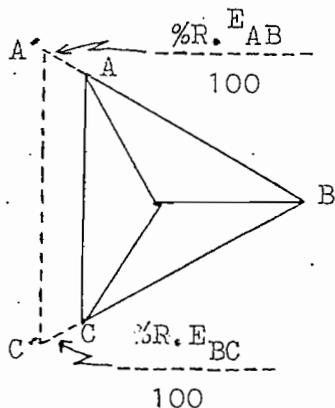


FIGURA 4.3

Diagrama fasorial de las tensiones cuando se instalan dos reguladores monofásicos en un circuito en delta abierto.

#### 4.4 Calibración y control de reguladores.

Los componentes de mayor importancia para el control y calibración del regulador son: el relé de regulación de la tensión, el relé de retardo de tiempo y el compensador de caída de tensión en la línea.

En la figura 4.4 se ilustra un diagrama de bloques del circuito de control del regulador.

##### 4.4.1 Relé de regulación de la tensión.

Este relé recibe la señal de tensión del circuito al que el regulador está instalado, si la tensión medida por el relé presenta un valor menor o mayor que los límites de tensión aceptables, hace que se cierren los contactos necesarios para que el regulador opere, elevando o disminuyendo la tensión en los terminales de salida del regulador.

El incremento o caída de tensión en el alimentador es limitado por el ancho de banda del regulador.

##### 4.4.1.1 Ancho de banda.

Es el rango de tensión dentro del cual el regulador no opera.

Debe calibrarse el ancho de banda de manera que el primero y el último consumidor reciban una tensión que permanezca dentro de la zona favorable. Generalmente se utiliza un ancho de banda tan pequeño como sea posible, usualmente 2 voltios

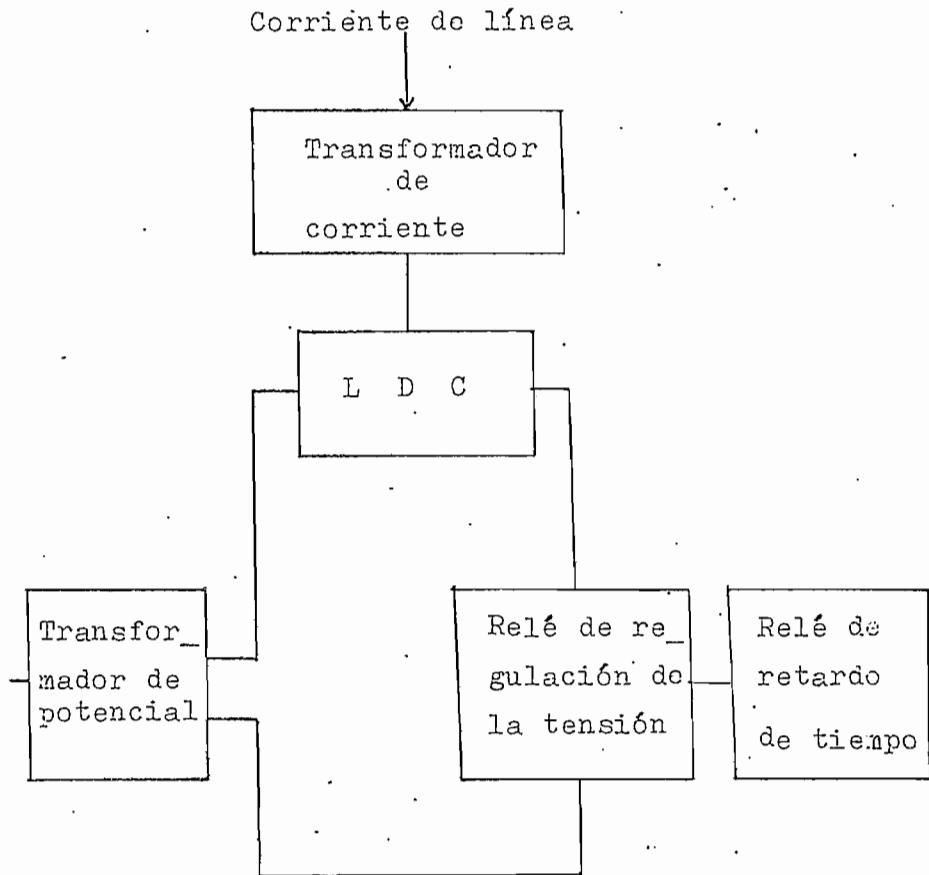


FIGURA 4. 4

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CIRCUITO DE CONTROL

DEL REGULADOR

(  $\pm 1$  voltio ), o también se puede calibrar el ancho de banda para un valor de 1.5 a 2 veces la variación de un paso del regulador.

Al reducirse el ancho de banda la longitud y la carga del alimentador pueden ser incrementadas (referencia 7)

Las siguientes ecuaciones dan la relación entre el incremento de la longitud y el incremento de carga del alimentador con la reducción del ancho de banda del regulador.

$$L = \left[ \left( \frac{V_s - B_2}{V_s - B_1} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (39)$$

En donde:

L = incremento de la longitud del alimentador.

Vs = variación máxima de la tensión en el alimentador.

B1 = ancho de banda inicial.

B2 = ancho de banda final.

En un alimentador urbano en el que generalmente no se tienen longitudes muy grandes, pero si altas densidades de carga, al reducir el ancho de banda del regulador se puede incrementar la carga a ser regulada.

Luego este incremento de carga se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$I = \frac{B_1 - B_2}{V_s - B_1} \cdot 100 \quad (40)$$

#### 4.4.2 Relé de retardo de tiempo.

Tanto el relé de retardo de tiempo como el ancho de banda del regulador influyen en el número de operaciones requeridas por el regulador, es recomendable que únicamente el relé de retardo de tiempo sea calibrado, ya que si este es corto el regulador operaría excesivamente debido a momentáneos cambios de tensión, esto puede ocurrir por ejemplo en los arranques de motores de gran capacidad.

En los reguladores actuales el retardo de tiempo puede ser calibrado entre 5 y 90 segundos; cuando se tiene dos o más reguladores conectados en serie en el alimentador, el que esté conectado más cerca a la fuente debe operar primero, luego el segundo regulador y así sucesivamente.

##### 4.4.2.1 Ancho de banda efectivo .

El ancho de banda que es medido a la salida del regulador, difiere un poco del ancho de banda calibrado, esto se debe al retardo de tiempo o errores en el diseño, construcción, calibración u operación del regulador (referencia 20).

Como se muestra en la figura 4.5 en donde el ancho de banda calibrado es de dos voltios, pero el ancho de banda a la salida del regulador es de 2.6 voltios.

Generalmente la diferencia entre los dos anchos de banda no es considerado al diseñar un sistema de distribución, sin embargo si la diferencia es grande puede ser considerada.

#### 4.4.3 Compensador de caída de tensión en la línea (LDC).

El com\_

pensador de caída de tensión en la línea es utilizado cuando se desea regular un punto alejado del regulador.

Consiste de una resistencia y de una reactancia inductiva, en las que se adelanta las caídas de tensión ocurridas tanto en la resistencia como reactancia del alimentador, desde el sitio de instalación del regulador hasta el punto de regulación.

En la figura 4.6 se muestra un gráfico del LDC, el transformador de corriente del regulador proporciona una corriente adicional a través de la resistencia y reactancia del LDC, la que es directamente proporcional a la corriente que circula por el alimentador. Los elementos del LDC se encuentran en el panel de control del regulador, y están calibrados en voltios, usualmente en base a 120 voltios.

En caso de no existir cargas intermedias conectadas entre el regulador y el punto de regulación, los valores de la resistencia y reactancia pueden ser obtenidos por medio de las siguientes ecuaciones (ref. 20)

$$R = \frac{CTP}{N_p T} r_l \cdot d \quad (41)$$

$$X = \frac{CTP}{N_p T} x_l \cdot d \quad (42)$$

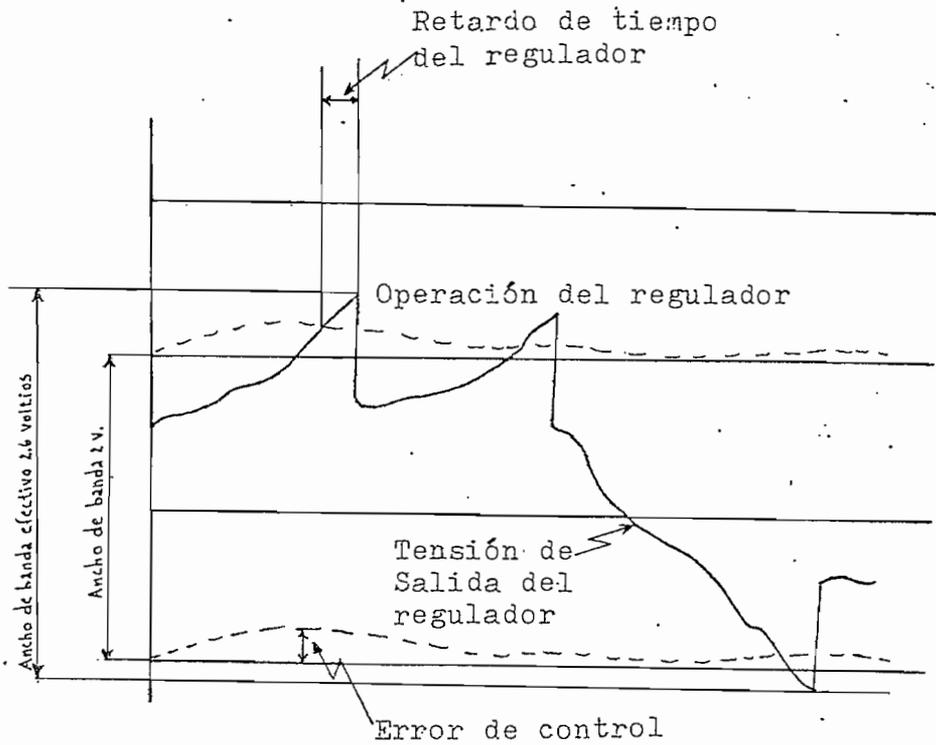


FIGURA 4.5

DIAGRAMA DEL ANCHO DE BANDA EFECTIVO DEL REGULADOR

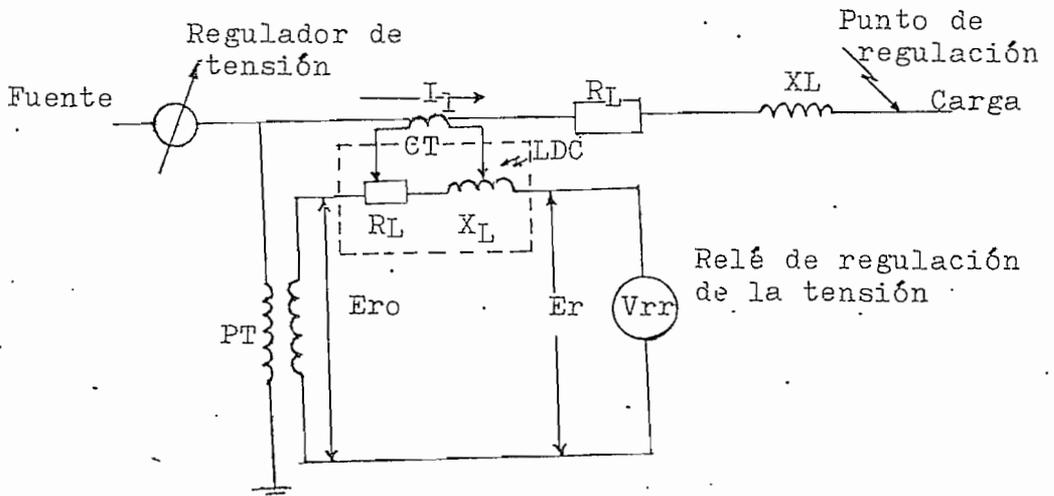


FIGURA 4.6

DIAGRAMA DEL CIRCUITO DE CONTROL Y DIAGRAMA DEL  
COMPENSADOR DE CAIDA DE TENSION EN LA LINEA

En donde:

- R = compensación de la resistencia en voltios.  
 X = compensación de la reactancia en voltios.  
 CTP = corriente nominal que circula por el bobinado primario del transformador de corriente.  
 NpT = relación del transformador de potencial.  
 r1 = resistencia de la línea en ohmios por unidad de longitud.  
 x1 = reactancia de la línea en ohmios por unidad de longitud.  
 d = distancia entre el regulador y el punto de regulación.

En el caso de existir cargas conectadas entre el regulador y el punto de regulación, se efectúa los cálculos de la siguiente manera:

$$R = \frac{CTP}{NpT} R.\text{efectiva} \quad (43)$$

$$R.\text{efectiva} = \frac{\sum_{i=1}^N V}{I_L} = \frac{I_{L1}.r1.d1 + I_{L2}.r2.d2 + \dots + I_{Ln}.rn.dn}{I_{L1}}$$

$$X = \frac{CTP}{NpT} X.\text{efectiva} \quad (44)$$

$$X.\text{efectiva} = \frac{\sum_{i=1}^N V}{I_L} = \frac{I_{L1}.x1.d1 + I_{L2}.x2.d2 + \dots + I_{Ln}.xn.dn}{I_{L2}}$$

En donde:

40

$I_{L1}$  = corriente en el tramo uno del alimentador.

$I_{L2}$  = corriente en el tramo dos del alimentador.

$I_{Ln}$  = corriente en el tramo n del alimentador.

$r_1$  = resistencia del tramo uno del alimentador.

$r_n$  = resistencia del tramo n del alimentador.

$d_1$  = longitud del tramo uno

$d_n$  = longitud del tramo n

#### 4.5 Comparación entre el uso de reguladores y capacitores.

Para establecer una comparación técnica entre el uso de reguladores y capacitores necesitamos establecer las funciones principales que desempeñan estos equipos, para lo cual utilizamos la tabla 4.2.

TABLA 4.2.-

COMPARACION ENTRE EL USO DE REGULADORES Y CAPACITORES

	Función	Reguladores	Capacitores
1	Puede elevar o disminuir la tensión.	SI	SI*
2	Puede elevar la tensión hasta el punto de generación	NO	SI
3	Incrementos pequeños de tensión	SI	NO
4	Número de operaciones alto	SI	NO
5	Reducción de pérdidas en el sistema.	NO	SI
6	Incremento de la capacidad del sistema.	NO	SI
7	Reducción de la capacidad térmica del sistema.	NO	SI
*	Se disminuye la tensión cuando se utilizan bancos de capacitores desconectables.		

ANÁLISIS ECONOMICO DEL USO DE REGULADORES DE TENSION

## 5.1 Introducción.

La finalidad de este estudio es el de paralela-  
mente al estudio técnico, analizar los beneficios económicos  
de la instalación de reguladores de tensión en alimentadores  
de distribución.

Los mayores ingresos propiciados por el regulador se basan  
únicamente en la mejoría del nivel medio de tensión, con el  
consecuente aumento del consumo, y por tanto un incremento  
de los rendimientos económicos, siendo además importante la  
imagen que la empresa eléctrica presente al consumidor.

## 5.2 Ventajas económicas.

Las ventajas económicas provienen del  
aumento de rendimientos por energía y demanda.

## 5.2.1 Aumento de rendimientos por energía.

Se efectúa un aná-  
lisis económico igual al realizado en el punto 3.2.3  
del capítulo III del presente trabajo.

Según la fórmula 24 se cumple para los reguladores:

$$Be_2/Be_1 = (V_2/V_1)^{1.6}$$

En donde:

$V_1$  = tensión inicial.

$V_2$  = tensión después de instalar el regulador.

$Be_1$  = energía vendida inicialmente en dólares.

$Be_2$  = energía vendida en dólares después de instalar el regulador.

Es válida también para los reguladores la tabla 3.1

De acuerdo con la fórmula 26 :

$$Be = P_1 \cdot fc \cdot T \cdot K_1 [(V_2/V_1)^{1.6} - 1]$$

En donde:

$P_1$  = potencia activa máxima para condiciones iniciales en Kilovattios.

$fc$  = factor de carga medio.

$T$  = número de horas considerado.

$K_1$  = costo de la energía en dólares por Kilovatio-hora.

#### 5.2.2 Aumento de rendimientos por demanda.

También en cuanto a la demanda en los reguladores se tiene:

$$Bp_2/Bp_1 = (V_2/V_1)^{1.6}$$

En donde:

$Bp_1$  = demanda vendida en condiciones iniciales en dólares.

$Bp_2$  = demanda vendida después de la instalación de reguladores en dólares.

Según la fórmula 28 :

$$E_p = K_2 \cdot P \left[ \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{1.6} - 1 \right]$$

En donde:

$E_p$  = incremento de los beneficios por demanda en dólares.

$K_2$  = costo de la demanda en dólares por Kilovatio.

$P$  = demanda activa máxima para condiciones iniciales en Kilovattios.

--Luego los beneficios globales por energía y demanda son:

$$B = K_4 \cdot P \left[ \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{1.6} - 1 \right] \quad (45)$$

En donde:

$$K_4 = K_1 \cdot f_c \cdot T + K_2$$

### 5.3 Evaluación de costos de instalación.

Para determinar el costo anual de instalación de una cierta cantidad de KVA en reguladores, se debe obtener un factor que proporcione el costo anual unitario por KVA, al que llamaremos " $K_r$ ", y para calcularlo nos valemos de la fórmula de "recuperación de capital" utilizada anteriormente.

$$K_r = \frac{C \cdot i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

En donde:

$C$  = inversión total por KVA del regulador instalado, incluido: costo del equipo, instalación, mantenimiento, etc.

$i = \text{interés.}$

$n = \text{período de tiempo para recuperar las inversiones}$   
(generalmente la vida útil del equipo)

Suponiendo que:

$$C = 30 \text{ \$/KVA}$$

$$i = 10 \%$$

$$n = 15 \text{ años}$$

Luego:

$$Kr = \frac{30 \times 0.1 (1 + 0.1)^{15}}{(1 + 0.1)^{15} - 1}, \quad Kr = 3.944$$

Los costos totales anuales de instalación son :  $Kr \cdot KVA_{(reg.)}$

#### 5.4 Relación BENEFICIO-COSTO.

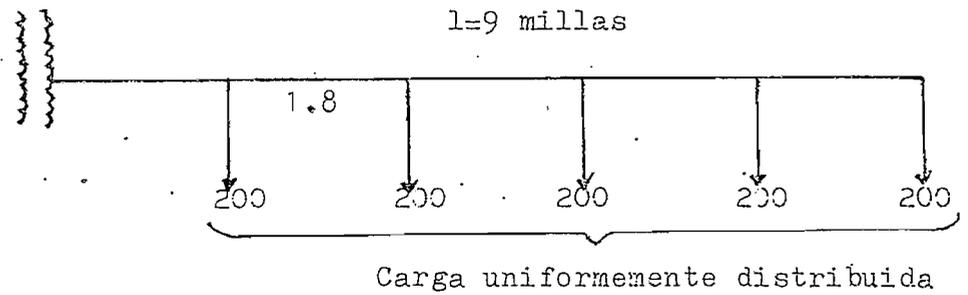
Para obtener la relación beneficio-costo B/D debemos dividir los beneficios obtenidos por energía y demanda para el costo total de la instalación de reguladores.

Luego:

$$\frac{B}{D} = \frac{K_4 \cdot P [(V_2/V_1)^{1.6} - 1]}{Kr \cdot KVA_{reg.}} \quad (46)$$

## CAPITULO VI

### EJEMPLO DE APLICACION



#### 6.1. DATOS DEL PROBLEMA

- Carga .....S = 1000 KVA
- Factor de potencia .....fp = 0.75 *considera*
- Potencia activa ..... P = 750 KW
- Potencia reactiva ..... Q = 661 KVAR
- Tensión nominal ..... V = 13.2 KV
- Corriente de carga ..... I = 47.74 amp.
- Factor de carga .....fc = 0.45
- Longitud del circuito ..... L = 9 millas
- Distancia equivalente entre conductores ... = 56 pulg,
- Resistencia del conductor 2/0 ACSR ..... r = 0.699ohms/milla
- Reactancia del conductor 2/0 ACSR ..... x = 0.747ohms/milla
- Potencia del transformador .....St = 2500 KVA
- Impedancia de placa del transformador .....Xt = 7%
- Horas al año consideradas ..... T = 8760 horas
- Factor de corriente reactiva .....F<sup>r</sup> = 0.75
- Costo del Kwh .....K<sub>1</sub> = 0.02\$/Kwh
- Costo del KVAR instalado en capacitores ...K<sub>q</sub> = 1.175\$/KVAR

Costo de un KVA instalado en reguladores ..... Kr=3.944\$/KVA  
 Circuito trifásico conexión enestrella, conductor(3x2/0+1x4) ACSR

6.2 Instalación de capacitores.

Encontramos la cantidad de KVAR ~~mas~~ óptima a instalarse en capacitores, calculando la corriente que aporta el banco de capacitores.

De acuerdo con la fórmula 18

$$I_c = \frac{2Y}{3Z} I_2$$

En donde :

$$Y = K1.Lf.T + K2$$

$$Z = K1.T + K2$$

Si K2 es el costo anual del Kw de capacidad instalado, para calcular este valor suponemos que los costos por Kw instalado son:

<i>Básico</i> →	Por generación...150\$/Kw (Referencia 12 )
	Por transmisión..100\$/Kw
	Por distribución.100\$/Kw
	Costo total.....350\$/Kw

Se encuentra el costo anual del Kw de capacidad instalado por medio de la fórmula de recuperación del capital.

$$K2 = \frac{C.i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Si:

Vida útil ..... n = 25 años

Interés ..... i = 10 %

Luego:

$$K_2 = \frac{350 \times 0.1 (1+0.1)^{25}}{(1+0.1)^{25} - 1}$$

$$K_2 = 38.56 \text{ \$/Kw. } *$$

\*En INECEL se considera el costo anual del Kw de capacidad instalado 27.17 dólares por Kilovatio por generación y transmisión, si se considera también el costo anual del Kw por distribución, el costo se incrementará en un 30%, o sea :

$$27.17 + 11.64 = 38.81 \text{ \$/Kw, } \text{o sea el valor calculado de } 38.56 \text{ es aceptable.}$$

Luego el valor de Y es:

$$Y = 0.02 \times 0.75 \times 8760 + 38.56$$

$$Y = 169.96$$

El valor de Z es:

$$Z = 0.02 \times 8760 + 38.56$$

$$Z = 213.76$$

Si  $I_2$  es la corriente reactiva que consume la carga:

$$I_2 \hat{=} I \cdot \text{sen}\theta$$

$$= 43.74 \times 0.661$$

$$I_2 = 28.91$$

Por tanto:

$$I_c = \frac{2 \times 169.96}{3 \times 213.76} \cdot 28.91$$

$$I_c = 15.32 \text{ amperios reactivos.}$$

Por tanto la capacidad mas óptima a instalarse en capacitores es:

$$Q_c = \sqrt{3} \cdot I_c \cdot KV$$

$$= \sqrt{3} \times 15.32 \times 13.2$$

$$Q_c = 350 \text{ KVAR}$$

Los cálculos siguientes se efectuarán suponiendo posible la instalación de 350 KVAR en capacitores, en la práctica hay unidades de 25, 50, 100, 150, 200 y 500 KVAR. Una posibilidad práctica sería instalar 3 unidades de 150 KVAR cada una, lo que da un total de 450 KVAR.

Partiendo del dato de los 350 instalados en capacitores el nuevo factor de potencia puede ser calculado por medio de la fórmula 8:

$$Q_c = P(\text{tg} \theta - \text{tg} \theta')$$

$$\text{tg} \theta' = \text{tg} \theta - Q_c / P$$

Luego

$$\text{tg} \theta' = 0.832 - 350 / 750$$

$$= 0.415$$

Por tanto el factor de potencia  $f_p = \cos \theta = 0.923$

El incremento de potencia activa se calcula por medio de la fórmula 7:

$$\Delta P = P(1 - \cos \theta / \cos \theta')$$

$$= 750 (1 - 0.75 / 0.923)$$

$$\Delta P = 140.57 \text{ Kw.}$$

El beneficio económico B1 obtenido al incrementarse la tensión es:

$$B1 = K2 \cdot \Delta P$$

$$= 38.56 \times 140.57$$

$$B1 = 5420.38 \text{ dólares.}$$

Para obtener el beneficio por reducción de pérdidas de poten\_

cia y energía utilizamos la fórmula 20

$$\begin{aligned} E2 &= 8 \cdot r \cdot l \cdot Y^2 \cdot I_2^2 / 9 \cdot Z \cdot 1000 \\ &= 8 \times 0.699 \times 9 \times (169.96)^2 \times (28.91)^2 / 9 \times 213.76 \times 1000 \\ &= 631.58 \text{ dólares.} \end{aligned}$$

Para obtener los beneficios técnico económicos debido al incremento de la tensión debemos efectuar los siguientes cálculos:

Cálculo del porcentaje de caída de tensión en la línea:

$$Vl\% = \frac{KVA \cdot l (r \cdot \cos\theta + x \cdot \text{sen}\theta)}{10(KV)^2}$$

Cuando en el alimentador las cargas son uniformemente distribuidas, para el cálculo se localiza la carga total en la mitad de la longitud del alimentador (referencia 17 )  
O sea la carga total es 1000KVA y la longitud  $l=9/2=4.5$  millas.

Por tanto:

$$Vl = \frac{1000 \times 4.5 (0.699 \times 0.75 + 0.747 \times 0.661)}{10(13.2)^2}$$

$$Vl = 2.63\%$$

El aumento porcentual de tensión en la línea al instalar capacitores es:

$$\begin{aligned} V\% &= \frac{Qc \cdot x \cdot l}{10(KV)^2} \\ &= \frac{350 \times 0.747 \times 4.5}{10(13.2)^2} \end{aligned}$$

$$V\% = 0.675$$

El aumento porcentual de tensión en el transformador es:

$$Vt\% = \frac{I_c}{KVAt} X_t$$

$$= \frac{350}{2500} \cdot 7$$

$$Vt\% = 0.98$$

La reducción total de tensión es:

$$0.675 + 0.98 = 1.655$$

El incremento de rendimientos por energía y demanda se obtiene por medio de la fórmula 29

$$B_3 = K_3 \cdot P [(V_2/V_1)^{1.6} - 1]$$

$$K_3 = K_1 \cdot f_c \cdot T + K_2$$

$$= 0.02 \times 0.45 \times 8760 + 38.56$$

$$K_3 = 117.4$$

$$B_3 = 117.4 \times 750 \left[ \left( \frac{1.01655}{1} \right)^{1.6} - 1 \right]$$

$$B_3 = 2343.11 \text{ dólares.}$$

El beneficio global obtenido al instalar capacitores:

$$B = B_1 + B_2 + B_3$$

$$= 5420.38 + 631.58 + 2343.11$$

$$B = 8395.07 \text{ dólares.}$$

La relación beneficio costo B/D es:

$$D = K_q \cdot Q_c$$

$$= 1.175 \times 350$$

$$D = 411.25 \text{ dólares.}$$

$$B/D = \frac{8395.07}{411.25}$$

$$B/D = 20.41$$

Por tanto por cada dólar invertido en instalar capacitores se obtienen 20.41 dólares de beneficio económico

### 6.3 Instalación de reguladores de tensión.

Para determinar los KVA nominales del banco de reguladores a instalarse, se usa la fórmula 36:

$$KVA_{reg.1\phi} = KVA_{carga} \cdot R\% / 3 \times 100$$

Luego los KVA nominales de cada regulador monofásico son:

$$KVA_{reg.1\phi} = 1000 \times 10 / 3 \times 100$$

$$= 33.33 \text{ KVA}$$

En el mercado se encuentra reguladores de 34.5 KVA tipo distribución; luego los KVA totales instalados en reguladores son:  $3 \times 34.5 = 103.5 \text{ KVA}$

De acuerdo con el gráfico 4.1 se instalarán los reguladores a 1/3 de la longitud total del alimentador, en este caso será a 3 millas desde el transformador de la subestación.

Para encontrar el beneficio económico debido al uso de reguladores se utiliza la fórmula 45.

$$B = K_4 \cdot P \left[ \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{1.6} - 1 \right]$$

Si el número de horas considerado es 8760 horas,  $K_4$  es igual a  $K_3$  calculado anteriormente, por tanto  $K_4 = 117.4$ .

Si se considera que con los reguladores se obtiene un incremento de tensión de un 2.5%, por tanto  $V_2 = 1.025V_1$ .

Por tanto:

$$B = 117.4 \times 750 \left[ (1.025)^{1.6} - 1 \right]$$

$$B = 3548.33 \text{ dólares.}$$

La relación beneficio costo es:

Si :

$$D = Kr. KVA_{\text{reguladores.}}$$

$$= 3.944 \times 103.5$$

$$D = 408.20 \text{ dólares.}$$

$$B/D = 3548.33/408.20$$

$$B/D = 8.69$$

Por tanto por cada dólar invertido en instalar reguladores se obtienen 8.69 dólares de beneficio.

## CAPITULO VII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 Conclusiones.

Es de gran importancia la regulación de la tensión en un sistema de distribución, una mala regulación causa molestias a los usuarios y produce pérdidas económicas a la empresa eléctrica.

El mantener la tensión dentro de los límites recomendables por las normas de diseño prolonga la vida de todos los equipos conectados al sistema.

Para mejorar la regulación de la tensión se puede instalar condensadores y reguladores de tensión en los alimentadores de distribución.

Los principales beneficios técnico económicos propiciados por los condensadores se deben a: La reducción de pérdidas de potencia y energía, aprovechamiento óptimo de la capacidad de las instalaciones, mejor regulación de la tensión y mejora en el factor de potencia, debiendo tomarse en cuenta que todos estos aspectos están íntimamente ligados entre sí, por lo que el estudio preferente de uno de ellos obliga a tomar en cuenta a los demás.

La compensación de reactivos se efectúa por medio de condensadores estáticos sean estos conectados en serie o en para

lelo, o por medio de condensadores síncronos.

Cuando las cargas conectadas al alimentador están uniformemente distribuidas, la ubicación más óptima es a dos tercios de la longitud total del alimentador, así como la capacidad más óptima a instalarse en capacitores es aproximadamente dos tercios de la carga reactiva total del sistema.

Hay dos tipos de reguladores de tensión: inducción y paso, siendo generalizado el uso de los reguladores de tensión tipo paso.

Los reguladores se deben instalar antes del punto en donde se produzca la tensión mínima permisible, para poder tener un incremento de cargas futuras localizadas entre el regulador y el punto de regulación, por lo que se debe calibrar adecuadamente el compensador de caída de tensión en la línea del regulador.

Al ajustarse el relé de retardo de tiempo o el ancho de banda se limita el número de operaciones requeridas por el regulador.

Al reducirse el ancho de banda del regulador, la longitud y la carga en el alimentador pueden ser incrementadas.

Los ingresos económicos obtenidos al instalar reguladores se basan únicamente en la mejoría de la tensión.

## 7.2 Recomendaciones.

Para mejorar el nivel de tensión es preferible utilizar condensadores y reguladores de tensión, antes

que hacer grandes inversiones en nuevas instalaciones en el sistema.

Debe darse preferencia a los capacitores instalados en paralelo en los alimentadores primarios..

Se recomienda tener cuidado en la instalación de capacitores sobre todo en condiciones de mínima carga.

Para cargas uniformemente distribuidas la ubicación mas óptima del banco de capacitores debe ser a dos tercios de la longitud total del alimentador, y la capacidad mas óptima a instalarse en capacitores es aproximadamente dos tercios de la carga reactiva total conectada en el alimentador.

Es adecuado el uso de capacitores en alimentadores urbanos en donde existan altas densidades de carga, o sea los transformadores pueden estar funcionando sobrecargados, o en los límites de su capacidad térmica, o en sistemas en los cuales el bajo nivel de tensión se debe a un bajo factor de potencia.

En alimentadores de distribución rurales en los que generalmente ~~son de~~ grandes longitudes, con grandes problemas de regulación, los capacitores no podrán resolver el problema en su totalidad, por lo ~~que~~ en este caso resulta mejor instalar reguladores de tensión tipo paso.

Finalmente para decidir entre la instalación de condensadores o reguladores de tensión, se debe analizar las características de funcionamiento de cada sistema en particular.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- AMUNDARAIN ROMULO-ARENAS ARTURO  
 Aplicación de capacitores serie en sistemas de distribución.  
 CIER-Tomo VI 1975 (Informe de Venezuela)
- 2.- ALELUIA JOSE-TORREÃO J.-MACHADO C.  
 Experiência no aplicação de capacitores em derivacao.  
 CIER-Tomo IV 1975 (Informe de Brasil)
- ③.- BROWN P. G. -OTTE G. W.-SALINELE L. E.  
 Economics of switched shunt capacitors and synchronous condenser Kilovar suply for transmission systems.  
 AIEE-Transactions-February 1955
- 4.- CHANG NELSON E.  
 Locating shunt capacitors on primary feeder for voltage control and loss reduction.  
 IEEE-Transactions power apparatus and systems.Octubre 1969
- 15.- CHANG NELSON E. /  
 Determination of primary feeder losses.  
 IEEE-Transactions power apparatus and systems.Diciembre 1968
- 16.- ELECTRICAL WORLD.  
 Capacitors reduce systems investment and losses.  
 Noviembre 1975.
- 17.- GENERAL ELECTRIC.  
 Aplicacion data capacitors-Diciembre 1968
- ⑧.- HIONIN VALENTIN.  
 Utilizacão de condensadores en redes de distribución

CIER-Tomo IV-1975 (Informe de Brasil)

9.-INFORME DE CADAFE.

Ubicación óptima de condensadores shunt fijos en sistemas de distribución.

CIER-Tomo VI-1975 (Informe de Venezuela)

10.-LYNCH F TOMAS.

Tercer simposio sobre factor de potencia.

Buenos Aires-Junio 1973.

11.-LOZADA MOISES.

Regulación de voltaje en la red de distribución de la ciudad de Ambato.

Tesis de grado E.P.N.

12.-Mc. GRAW EDISON COMPANY.

Ventajas económicas y aplicación de condensadores en sistemas eléctricos.

Canonsburg-Pa-15317.

13.-Mc. GRAW EDISON COMPANY.

Catálogos sobre reguladores-1974

14.-RODRIGUES IGOR-GERRERO G. SAAVEDRA A.

Influencia de la potencia reactiva en el diseño de un sistema eléctrico.

CIER-Tomo IV-1970 (Informe de Chile)

15.-PINTO WAGNER G. CALIXTO CARLOS A.-IQUENAGA MIGUEL Y.

Análisis económica para empleo de equipamientos corregidos

vos.

CIER-Tomo IV-1975 (Informe de Brasil).

16.-REA-Boletín 169-1

The application of shunt capacitors to the rural electric system.

Washington, D.C. Abril 1952

17.-REA-Boletín 169-27

Voltage regulator application on rural distribution systems.

Washington, D.C. Marzo 1954

①8.-SCHMILL V.

Optimum size and location of shunt capacitors on distribution feeders

IEEE-Transactions on power apparatus and systems.

Vol pas 84, N.-9, Septiembre 1965

19.-WEEDY B. M.

Electric power systems.

20.-WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION

Distribution systems

Electric Utility Engineering Department-Diciembre 1969