

13

2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
CAMPUS ARAGON

**VENTAJAS QUE REPRESENTA LA
UTILIZACIÓN DE 34.5 KV. DE
TENSIÓN EN REDES DE
DISTRIBUCIÓN**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
**INGENIERO MECANICO
ELECTRICISTA**
-AREA ELÉCTRICA ELECTRONICA-
P R E S E N T A :
MIGUEL ANGEL CAJIGAS SILVA

ASESOR: ING. EDUARDO RODRIGUEZ FLORES

MÉXICO

1998

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

266 457



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

**VENTAJAS QUE REPRESENTA LA
UTILIZACIÓN DE 34.5 KV DE
TENSIÓN EN REDES DE
DISTRIBUCIÓN**

MIGUEL ANGEL CAJIGAS SILVA

1998

A Dios

Por darme la ventura de ver realizados mis propósitos.

A mis Padres:

José Cajigas Ramírez †

María Esperanza Silva

Por que ésta meta lograda, confirma una vez más la grandeza de ustedes, gracias por su cariño, apoyo y dedicación.

A mis Hermanos:

José Jaime, Manuel, Fernando, Rebeca del Rocío, Jorge,
Francisco Javier, José, Ricardo y Armando.

Por el apoyo, cariño, comprensión y respeto que siempre me han brindado.

A Nancy Carbajal Gómez (mi chiquita)

A ti por que has contribuido en gran medida a formar y realizar mis sueños.

A todos y cada uno de mis profesores:

Gracias por realizar tan noble y valiosa labor.

A mis amigos y compañeros:

Por que nunca se vean truncadas sus metas.

A mi querida U.N.A.M.

Por albergarme en su lecho de conocimientos.

CONTENIDO

INTRODUCCION	1
ANTECEDENTES HISTORICOS	5
JUSTIFICACION	10
DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	11
MARCO TEORICO.....	13
OBJETIVOS	16

CAPITULO I

DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION.....	17
SUBESTACIONES DE DISTRIBUCION	19
RED DE DISTRIBUCION PRIMARIA	19

POR SU CONSTRUCCION:

- RED AEREA	20
- RED SUBTERRANEA	21
- RED MIXTA	22

POR SU OPERACION:

- RED RADIAL	22
- RED EN PARALELO	25

TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION	30
RED DE DISTRIBUCION SECUNDARIA	31
SUMINISTRO Y APARATOS DE MEDICIÓN AL CONSUMIDOR ...	32

CAPITULO II

ASPECTOS QUE RIGEN EL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE REDES DE DISTRIBUCION	39
II.1 DESARROLLO DE LAS ECUACIONES GENERALES PARA RESTRICCIÓN POR CAIDA DE TENSION	40

II.2 EFECTO DE AUMENTO DE TENSIÓN EN ALIMENTADORES CON RESTRICCIÓN POR CAIDA DE TENSION	50
II.3 DESARROLLO DE LAS ECUACIONES GENERALES CON RESTRICCIÓN TERMICA	55

CAPITULO III

COMPORTAMIENTO DE CARGAS A DIFERENTES TENSIONES	61
III.1 DESARROLLO DE LA ECUACION PARA CALCULAR LA REGULACION	62
III.1.1 REGULACION SEGUN EL NIVEL DE TENSION	66
III.2 PERDIDAS A DIFERENTES TENSIONES	70
III.3 CONDUCCION	72
III.4 AISLAMIENTOS	75
III.4.1 NIVEL DE AISLAMIENTO AL IMPULSO	82
III.4.2 COORDINACION DEL AISLAMIENTO	86
III.4.3 NIVELES DE AISLAMIENTO AL IMPULSO NORMALIZADOS	86

CAPITULO IV

CONSIDERACIONES PARA INCREMENTAR LA TENSIÓN EN RED ES DE DISTRIBUCION	88
IV.1 EN AREAS URBANAS CON ALTA DENSIDAD DE CARGA ...	89
- TRAYECTORIAS SATURADAS	89
- UTILIZACIÓN OPTIMA DE SUBESTACIONES	90
IV.2 EN AREAS DE DISTRIBUCION RURAL	91
IV.3 EVOLUCION, BENEFICIOS Y PROBLEMAS DE LA DISTRIBUCION PRIMARIA A 34.5 Kv	93
CONCLUSIONES	99
BIBLIOGRAFÍA	101

INTRODUCCIÓN

Podemos afirmar que el grado de desarrollo económico y social de una nación está relacionado con su capacidad infraestructural. El apereamiento de esta realidad ha llevado a nuestro gobierno a la nacionalización de la industria eléctrica, buscando extender el servicio a todas las zonas rurales y fortalecer la distribución eficientemente en las ciudades.

En éstas la concentración de población obliga a una infraestructura de servicios de óptima calidad, grandes obras son realizadas para satisfacer los requerimientos de las necesidades primordiales, el transporte colectivo, el abastecimiento de agua potable, la vialidad, el drenaje, la seguridad pública y desde luego el suministro de energía eléctrica, son rubros sujetos a constantes revisiones.

También tenemos la evolución de equipos y aparatos eléctricos más sofisticados e indispensables en los hospitales, laboratorios de experimentación, oficinas públicas y privadas, en los diferentes tipos de la industria, en el hogar, operan a todas horas y además necesitan continuidad estricta del servicio, porque una breve falla perjudicará un cultivo experimental, probablemente una operación quirúrgica, un programa de computadora, el recubrimiento de un horno eléctrico, varios procesos continuos de fabricación, etc. Aun en el hogar dejarán de operar el refrigerador y los aparatos que facilitan los trabajos domésticos. Desde luego algunos aparatos de estos ejemplos resultarán afectados si la calidad del servicio no está dentro de los límites de la regulación de voltaje.

Prueba de este problema son la infinidad de quejas que se acumulan mensualmente en las oficinas del sector eléctrico por los conceptos de

interrupciones y bajo voltaje, pagando indemnizaciones por averías a aparatos eléctricos de los consumidores.

Definitivamente la distribución de energía eléctrica debe y puede efectuarse en óptimas condiciones de calidad y continuidad, para ello hay que conjuntar, mejoras continuas al sistema y personal técnico capacitado y responsable.

Estas mejoras deben considerar la enorme cantidad de solicitudes de nuevos servicios con diferentes tipos de carga cuya demanda sumada a la existente llega muchas veces a saturar la capacidad de los transformadores y alimentadores y finalmente la de las subestaciones, dándose el caso de congestionar las avenidas de postes, agotando posibilidades de nuevas trayectorias de líneas de distribución y convirtiendo a las ciudades en auténticas selvas de postes, lo que se conoce como contaminación estética del paisaje urbano. Para evitar esta situación se efectúan instalaciones subterráneas, solo que ellas son costeables en zonas con muy grandes densidades de carga o bien cuando su costo se incluye en exclusivas áreas residenciales.

El capítulo I hace referencia a los sistemas de distribución tanto por su construcción como por su operación. Se ha preferido desarrollar el estudio en líneas aéreas por su definitiva extensión en las áreas urbanas y rurales.

En el capítulo II se analizará el comportamiento de una red de distribución y se emplea la figura geométrica de un rectángulo, que facilita conocer el efecto que causa en la red la alteración de uno de los parámetros como el cambio de tensión de alimentación, crecimiento de la carga. Etc. Partiendo de varias consideraciones se desarrollan las relaciones

matemáticas existentes entre los parámetros involucrados, tomando en cuenta dos restricciones que son el límite de regulación y el límite térmico, efectuando algunos ejemplos de aplicación.

El capítulo III efectúa un estudio comparativo de carga alimentadas a diferentes tensiones, considerando la regulación, las pérdidas de potencia real, la capacidad de conducción y el aislamiento. Las tensiones propuestas son 3, 6.6, 13.2, 23 y 34.5 KV por ser históricamente las empleadas en los sistemas de distribución del país.

El capítulo IV hace referencia a dos conductas por las cuales podemos proponer el incremento de tensión, la primera en los núcleos de población con gran densidad de carga como sucede en las ciudades y en parques industriales, y la segunda en las zonas rurales en donde la política del Estado es impulsar su electrificación completa y en la que técnicamente encontramos cargas pequeñas y demasiado espaciadas. Por lo anterior se enfoca la utilización del más alto nivel de voltaje de 34.5 KV para la distribución urbana y rural; que permite para las ciudades, aprovechar de mejor manera los circuitos instalados (con el consecuente cambio de aislamientos, transformadores, equipo de protección, etc.), pudiéndose abastecer a mayor número de consumidores y alargar en lo posible las troncales del sistema; y en lo rural, poder ofrecer el servicio a grandes distancias con una regulación aceptable. En este renglón el aprovechamiento de las redes de subtransmisión que operan en el país ha facilitado proporcionar el servicio. Este capítulo termina realizando una breve semblanza de la evolución de las tensiones de distribución, mostrando sobre un estudio realizado los beneficios a 34.5 KV.

En nuestro medio, la implementación de mejoras al servicio eléctrico requiere de cuantiosas inversiones procedentes del sector público quien

absorbe en forma parcial o total el financiamiento de las obras, de acuerdo con las costumbres, convenios o leyes en vigor. Por lo que en vista a una mejor distribución de los recursos disponibles, la utilización de técnicas optimizadas se impone, para que la aplicación de los ya citados recursos se derramen en beneficio de un mayor número de obras favoreciendo a más consumidores.

El presente trabajo no pretende agotar la riqueza del tema, ya que cada uno de los puntos tratados requiere de un estudio detallado y de la experiencia que otorga el ejercicio de la ingeniería; sin embargo, hemos puesto todo el interés, capacidad y dedicación para elaborarlo.

ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El conocimiento por la humanidad de esa forma de la energía que se llama electricidad, de sus manifestaciones, de sus propiedades, de sus aplicaciones, y sobre todo, de su naturaleza, es reciente, prácticamente poco más de un siglo.

Se sabe, no obstante, que en la antigua Grecia, allá por el año 640 antes de J.C. ya se conocía el hecho de que el ámbar, una resina fósil, frotado con una piel o tela de lana, atrae partículas ligeras como plumillas de ave; el nombre de ámbar en griego es elektrón, por lo que se justifica etimológicamente el nombre de electricidad.

Claro está que ello no condujo a nada práctico, como tampoco lo tuvo el prever asombrosamente la existencia del átomo en las escuelas filosóficas de aquella época, cuya pretendida condición de indivisible, en griego a-tomem, (no divisible) es la razón de su actual e impropio nombre.

Desde miles de años antes además, la humanidad conocía formidable descarga eléctrica llamada rayo, pero, lógicamente, no podían relacionar en modo alguno con el ámbar.

Con anterioridad había ya el conocimiento de la propiedad atractiva de la piedra imán, y de su orientación respecto a la tierra, de lo que si se sacó alguna utilidad, pues una rudimentaria brújula se usaba en China en remotas épocas prehistóricas.

Aparte de este hecho, ninguna otra consecuencia práctica se obtuvo de estos experimentos, ni ninguna teoría se esbozó. Habían de pasar más

de dos mil años, para que el físico W. Gilbert -en el año 1600 aproximadamente- comprobara que otros cuerpos como el vidrio, el azufre y la resina, además del ámbar, estaban dotados de la misma propiedad de atracción.

Algo después, en 1663, Otto de Guericke, realiza la primera máquina electrostática y deduce la existencia de dos clases de electricidad, la positiva (+) y la negativa (-).

La diferenciación de los cuerpos en buenos y malos conductores, sigue algo después -hacia 1730-, con lo que se dispone ya de conocimientos y teorías que permiten construir una máquina electrostática rotativa, que faculta experimentar la conducción de la electricidad a través de los alambres, la ignición de materias inflamables y la chispa eléctrica, cayendo en la cuenta de su similitud con el rayo atmosférico; se supone entonces que se trata de un imposible -que no tiene peso- e hipotético fluido, impropio nombre aún en uso.

Cabe señalar la invención en 1745 de la llamada botella de Leyde, que es el primer condensador, dando pie a Franklin, por el entonces ya conocido carácter eléctrico del rayo, para idear el pararrayos. Con ésta botella condensador se logran espectaculares experiencias que causan asombro y admiración.

En 1789 Coulomb enuncia las leyes sobre cantidad de electricidad y sobre atracciones y repulsiones, encontradas experimentalmente. Todo ello, sin embargo, se refiere exclusivamente a la electricidad estática. El punto de partida del descubrimiento y aplicación de la electricidad dinámica se debe a Volta, que en 1800, al iniciarse el siglo llamado del progreso, ideó su columna o pila, primer generador de electricidad dinámica, entonces llamada galvánica -de Galvani que en 1780 descubrió la

electricidad de contacto-. Las experiencias a que dió lugar este aparato permitió establecer hipótesis con que iniciar el conocimiento de la corriente eléctrica.

Puede decirse que paralelamente se produce el descubrimiento del electromagnetismo por Oersted -1820-, siguiendo inmediatamente la enunciación de las leyes de la electrodinámica por Ampere.

Con la ley de Ohm sobre la relación entre tensión, resistencia e intensidad -1826-, y la de Joule en 1841, sobre la transformación de la energía eléctrica en calorífica, se dispone ya de los conocimientos básicos para lograr una rápida, insospechada y espectacular conquista de la energía eléctrica en contraste con el lentísimo avance en los conocimientos sobre esta materia que hasta ese momento se habían conseguido.

Seguidamente, en 1831, Faraday descubre la inducción electromagnética, la autoinducción y las primeras leyes electroquímicas. En consecuencia seguidamente se idean y desarrollan, el telégrafo en 1833; la galvonoplastia, 1836; la lámpara de incandescencia, 1854; el acumulador de plomo, 1859; la dinamo, 1860.

Maxwell, físico y también matemático, relaciona en 1864 la electricidad con el magnetismo e idea avanzadas teorías e hipótesis sobre la luz, los campos magnéticos, y las ondas electromagnéticas, adelantándose en varias décadas a su demostración práctica, previendo la existencia de fenómenos insospechados e impercibibles, que abrieron el camino para nuevos descubrimientos como la velocidad de la luz y las ondas de radio.

El teléfono aparece en 1861, por Reis, perfeccionando por Bell en 1876, siendo cada vez mayores las aplicaciones que se logran, como nuevas y más perfeccionadas pilas.

Con Gramme empieza el reinado de la corriente alterna -1878- y pocos años después se idea el transformador estático, en 1884. Todo ello es la base del incesante desarrollo de la tecnología eléctrica, con hornos eléctricos, distribuciones de alta tensión, motores, etc.

Al final del siglo XIX, Hertz estudia y resuelve la emisión y detección de las ondas eléctricas que permitirá la telegrafía sin hilos.

Al empezar el siglo actual ya se emplea la corriente trifásica, y por tanto son de uso normal los diferentes tipos de motores trifásicos; empiezan a montarse poderosas centrales eléctricas destinadas a suministrar energía para luz y para fuerza a las más importantes poblaciones.

En un principio la generación y utilización de electricidad se veía afectada gravemente por el hecho de que se tenía que consumir prácticamente en el mismo lugar donde se generaba, debido a la incapacidad, entonces, de llevar la energía a distancias pues había grandes pérdidas ocasionadas por fuertes caídas de tensión en los sistemas de transmisión y distribución, ya que se utilizaban niveles de voltaje relativamente bajos para tales efectos. Esto representaba una gran barrera para el progreso y desarrollo de la explotación de la energía eléctrica.

Fue entonces que con la aparición de una máquina eléctrica estática llamada transformador, se logró romper la barrera de la transmisión de energía a distancias. Dicho transformador permitió modificar los niveles de tensión y corriente en un sistema eléctrico sin alterar los niveles de potencia, y así permitir al hombre dejar a un lado los problemas de caídas

de tensión, en los sistemas de transmisión y distribución; el gran obstáculo de utilizar conductores de calibres extremadamente grandes e inconvenientes y también se logro llegar a niveles de regulación de voltaje aceptables, esto ultimo ocasionado por la mejoría de los dos aspectos anteriormente dichos.

A pesar de este importante avance, en la evolución de la explotación de energía eléctrica, se han requerido cada vez más cambios y avances para optimizar dicha explotación. Y uno de los aspectos en los cuales se hará énfasis es en el rubro de la evolución de las tensiones o voltajes utilizados en la distribución de la electricidad.

Haciendo un recuento de los niveles de tensión empleados en el país podemos notar una ascendencia de voltajes que van desde los 3000 hasta los 34500 volts. Esta serie de aumentos se debe principalmente a que aumentan las demandas de suministro eléctrico en las entidades densamente pobladas, en la industria y en poblaciones rurales que aunque no representan grandes cargas como las primeras, deben de tomarse en cuenta por el hecho de que estas pequeñas cargas se encuentran muy distanciadas entre sí y a su vez todas ellas en conjunto, se encuentran distantes de el lugar donde se genera y/o se comienza a distribuir la electricidad.

Así pues, la intervención de la electricidad en la vida humana es cada vez más amplia y más imprescindible, hasta tal punto que el consumo de electricidad denota el grado de adelanto y civilización en una población. Cabe suponer que en el futuro, seguirá incrementándose esta utilización, tanto en las actuales como en otras nuevas e insospechadas actividades, y por tanto el consumo de energía eléctrica por la humanidad será cada vez más imprescindible, extenso e importante.

JUSTIFICACIÓN

La distribución de energía eléctrica es un área de gran importancia en la utilización de la misma, o bien, en los sistemas eléctricos de potencia propiamente dicho. La generación, transmisión y distribución de energía eléctrica son los tres aspectos fundamentales que implican la utilización y aprovechamiento de la electricidad y aunque cada uno es de capital importancia, en el presente trabajo atenderemos el aspecto de la distribución por ser uno de los rubros en los cuales nos vemos más familiarizados, pues para conocer un sistema de distribución físicamente, solo basta salir a las calles y observar toda la infraestructura de postes, transformadores, cables, aisladores, cuchillas, etc., que conforman las redes de distribución de nuestra comunidad.

Así mismo, el llegar a futuros estudiantes de ingeniería los conocimientos adquiridos al realizar este trabajo, representa una gran satisfacción personal, pues es de valiosa ayuda contar con información que completamente los conocimientos acerca del tema, ya que la gran desventaja de no contar con los recursos económicos necesarios para adquirir material y equipo didáctico de este tipo obstaculiza en gran medida la información de un profesionalista pues ya en el campo de trabajo no hay oportunidad alguna de experimentar y/o aprender mediante errores por que esto representa la integridad de muchas personas y además un elevado costo que cubrir por los equipos que puedan resultar dañados.

La motivación principal para realizar este trabajo fue la relevancia que ha tenido la implementación de los niveles de tensión cada vez más altos en las redes de distribución y comprender por que y en que se ha beneficiado la distribución al elevar los niveles de tensión.

DESCRIPCIÓN DE PROBLEMÁTICA

El descontrolado crecimiento poblacional en entidades urbanas densamente pobladas, como es el caso de las grandes ciudades de nuestro país representa un grave problema, entre otros, para cubrir las exigencias y demandas de energía eléctrica que este crecimiento representa pues al aumentar la población se habla de el crecimiento obligado de toda una compleja infraestructura que implica entre otros, viviendas, hospitales, escuelas, vías publicas, etc. Y que toda esta infraestructura a su vez representa mayor consumo de energía eléctrica, y junto con ello, cambios, mejorías e implementación de nuevas redes de distribución que puedan satisfacer las necesidades de energía. Además sumemos a ésta problemática de crecimiento urbano el hecho de realizar nuevas conexiones y llevar la electrificación a entidades rurales donde no cuentan con este valioso recurso pero están en la sita de espera para contar con electricidad.

Para tales fines, se requiere de grandes recursos económicos y tecnológicos, no obstante, este grave problema se vería aun más acrecentado si no se toman las precauciones necesarias de planear y proyectar a futuro los sistemas de distribución existentes, así como aquellos que están por ser instalados.

Uno de los factores en la explotación de la energía eléctrica que prevee este problema es una adecuada asignación de tensión en los sistemas de distribución pues de lo contrario al aumentar la demanda de electricidad se presentarían problemas que se ven directamente relacionados cuando al aumentar la carga aumenta la intensidad de corriente, si se mantiene la tensión constante y que a continuación se describen.

- ◆ **Instalación de conductores de mayor calibre:** Un incremento de consumo de energía, representa en un sistema eléctrico, un incremento de intensidad de corriente y con ello surge la necesidad de utilizar conductores más gruesos para que puedan soportar el paso de dicha corriente.
- ◆ **Utilización de conductores paralelos:** hay casos en los que no sería suficiente utilizar el conductor de mayor calibre existente para conducir la corriente que un sistema o comunidad demanda, es entonces cuando se implementan conductores paralelos en el sistema lo cual representa mayores problemas de mantenimiento y operación de la red.
- ◆ **Soportería:** Otro inconveniente directamente reflejado de los dos anteriores es el de la necesidad de utilizar equipo y soportería más robusta y por tanto costosa en el sistema.
- ◆ **Regulación:** la regulación de voltaje es un problema grave que se presenta en los sistemas donde son empleados niveles de tensión relativamente bajos, pues la regulación es afectada cuando la demanda de energía crece en un sistema o simplemente cuando hay que cubrir distancias considerables para llevar la energía a los otros centros de consumo.
- ◆ **Perdidas en los conductores:** Al utilizar niveles de voltaje bajos es mayor la pérdida de energía en los conductores, debido a las propiedades físicas de los mismos, lo cual implica un problema grave en la distribución rural donde hay que cubrir distancias considerables para alimentar cargas pequeñas.

MARCO TEORÍCO

Acometidas: Una acometida es el punto final en un sistema de distribución, pues aquí concluye la distribución de la energía y de aquí mismo se parte hacia la utilización de la misma, en este punto es donde se instalan los aparatos de medición y hasta este punto la compañía suministradora de energía se hace cargo de construcción, instalación y mantenimiento al sistema.

Aislamiento: Hay cuerpos cuya resistencia eléctrica es varios millones o aun varios miles de millones, mayor que la de cuerpos conductores que comúnmente conocemos (metales). Estos cuerpos o material de tan elevada resistencia se llaman aislantes.

Alimentadores: Los alimentadores son las líneas o conductores que distribuyen la energía; hay dos tipos de alimentadores: los alimentadores primarios o troncales y los alimentadores secundarios. Los primeros son aquellos en los cuales se lleva la totalidad de energía a distribuir generalmente los conductores son más robustos debido a la necesidad de conducir mayor corriente. Los alimentadores secundarios o ramales son las derivaciones o líneas que parten de una troncal y continúan distribuyendo la energía, sólo que en esta ocasión la cantidad de energía es menor de ahí que es menos robusto el calibre de conductores empleados.

Caída de Tensión: A la fuerza empleada para movilizar los electrones a través de un conductor, aparato o sistema se le llama caída de tensión.

Por ejemplo: para alimentar un aparato eléctrico se cuenta con 10 volts de tensión al inicio del circuito y al desplazar la energía y alimentar el aparato eléctrico se cuentan con 8 volts, se tiene que hubo una caída de tensión de 2 volts debido a las características resistivas del conductor.

Carga: Es en el caso de la electricidad cuando se habla de una demanda de energía, o bien, aparato, máquina, equipo o sistema que es alimentado con energía eléctrica.

Continuidad: Se refiere al suministro permanente de energía eléctrica en un sistema o en su defecto cuando se ausenta la electrificación en el sistema, se debe procurar que dicha ausencia sea el mínimo de ramales o área posibles.

Densidad de Carga: Se refiere a la magnitud o dimensión de una carga.

Perdidas: La energía eléctrica que se consume en un conductor ó bobina transformándose en calor, es la principal causa de las perdidas de energía en los circuitos o sistemas eléctricos. A este fenómeno se le denomina efecto Joule en honor al francés que formulo las leyes térmicas relativas a la corriente eléctrica.

Regulación: La regulación de voltaje es la acción de mantener limites establecidos tanto inferior como superior de nivel de tensión en un circuito o sistema eléctrico, para así asegurar el correcto y eficaz funcionamiento de la maquinaria y/o equipo que se esta alimentando.

Resistividad y Conducción: Se llama resistividad a la resistencia que presenta al paso de la corriente un conductor, la resistencia es proporcional a la distancia e inversamente proporcional a la sección de un conductor su unidad de medida esta dada en Ohms (Ω). A la inversa de la resistividad se le llama conductividad y se representa por la letra C.

Tensión: Un generador o una pila produce una fuerza (fuerza electromotriz) que impulsa a los electrones en un circuito a recorrerlo, venciendo para ello las dificultades o resistencia eléctrica que se presentan en su recorrido, esa fuerza que se da a los electrones va aminorándose en el

circuito; fuerza que en este caso se denomina tensión o popularmente llamada "Voltaje" por el hecho de que su unidad de medida esta dada en Volts.

Transformador: Máquina eléctrica estática con la cual se logra modificar la magnitud de voltaje y corriente.

OBJETIVOS

El avanzado y continuo desarrollo de la tecnología y por tanto la creciente necesidad de consumir y administrar energía eléctrica con niveles de calidad en regulación y en continuidad de servicio aceptables; son unos de los aspectos principales que deben considerarse en la explotación de la energía eléctrica hoy en día.

Es por ello que los principales objetivos del presente trabajo son demostrar las ventajas que representan el utilizar un nivel de voltaje adecuado en las redes de distribución, así como hacer un análisis detallado acerca de los factores que deben de ser tomados a consideración cuando se habla de diseño, construcción y puesta en servicio de una red o sistema de distribución eléctrica ya sea en una zona industrial urbana o rural.

De igual forma se pretende señalar la existencia de una alternativa fácil para optimizar la distribución eléctrica cuando las condiciones y características de una red no sean suficientes para abastecer la creciente demanda de energía eléctrica.

Y por ultimo comprender la importancia de hacer una correcta y planeada asignación de nivel de tensión en los sistemas eléctricos de potencia.

CAPITULO I

DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Sin lugar a dudas el proceso industrial de una nación puede medirse o cuantificarse en el desarrollo que alcanzan sus fuentes de energía y la forma de transportarla de un lugar a otro, así como su conversión en su forma más útil. Por ello los sistemas eléctricos de potencia tienen en la actualidad severa importancia para la economía industrial.

Para poder definir un sistema de distribución es necesario citar brevemente los diferentes elementos que intervienen en un sistema eléctrico de potencia.

La energía eléctrica se produce a través de plantas generadoras y es transportada por los sistemas de transmisión hasta las subestaciones de distribución a partir de aquí podemos decir que se compone de un sistema de distribución, el cual se encargará de suministrar la energía a los usuarios mediante alimentadores primarios, transformadores de distribución, alimentadores secundarios y por último conexiones y aparatos de medición al consumidor.

A continuación en la figura 1.1 se ilustra un sistema eléctrico de potencia.

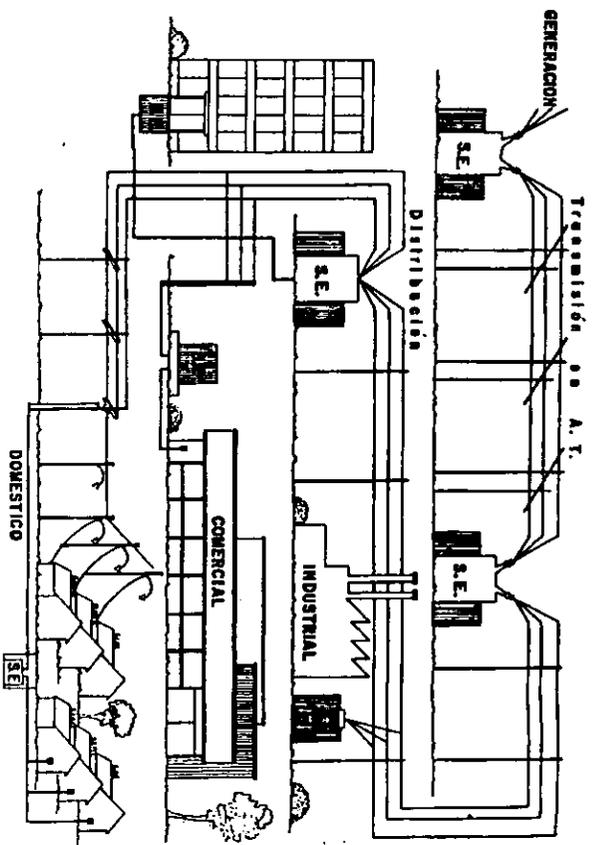


FIGURA 1.1

Dentro de los elementos que integran un sistema de distribución se guarda una interrelación que requiere para su construcción y operación de un diseño y planeación ordenado y preciso.

Luego un sistema de distribución comprende:

1. Subestaciones de distribución.
2. Red de distribución primaria.
3. Transformadores de distribución.
4. Red de distribución secundaria.
5. Suministro.
6. Aparatos de medición al consumidor.

SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN

Las subestaciones de distribución tienen el cometido fundamental de reducir el voltaje de transmisión o subtransmisión al de distribución primaria. Las subestaciones constan de uno o más bancos de transformadores de potencia junto con el equipo necesario para regular el voltaje, buses e interruptores de alta tensión, así como los elementos de protección para condiciones anormales.

RED DE DISTRIBUCIÓN PRIMARIA

El término red de distribución primaria, se aplica a la parte de un sistema eléctrico comprendida desde el bus de baja tensión de las subestaciones de distribución, hasta los transformadores o acometidas a

servicios de alta tensión, su función consiste en distribuir la energía a voltajes medios en la zona de carga.

Atendiendo a su tipo de construcción las redes se clasifican en:

1. Red aérea.
2. Red subterránea.
3. Red mixta.

RED AÉREA. Se caracteriza, porque todos sus elementos se instalan en postes o estructuras; los conductores generalmente están aislados únicamente por aire a todo lo largo de los alimentadores, excepto en los puntos intermedios de apoyo y terminaciones. La sencillez y economía en su construcción ha hecho su empleo muy extendido tanto en zonas urbanas, suburbanas y rurales.

La red aérea se compone de los siguientes elementos:

1. Conductores.
2. Accesorios (guarda preformada, parche preformado, empalmes tubular y preformado, remate preformado, conectores, grapas, etc.)
3. Postes.
4. Aisladores.
5. Herrajes.
6. Crucetas.
7. Retenidas.
8. Cuchillas.
9. Transformadores de distribución.
10. Pararrayos.
11. Portafusibles.
12. Equipos de medición.

Para efectos de una mejor exposición escrita, sin pretender detallar, se agregan algunas de las normas de materiales y montajes más usuales, así como su correspondiente lista de materiales para líneas aéreas de distribución al final del presente capítulo.

RED SUBTERRÁNEA. Se caracteriza porque todos sus elementos están localizados en el subsuelo, ya sea instalándolos directamente enterrados o en ductos y bóvedas.

Aunque el costo de los sistemas subterráneos es mayor que los aéreos, ofrecen en cambio una mayor continuidad de servicio, dependiendo del tipo de construcción al evitarse muchas de las causas que provocan interrupciones en el sistema aéreo, tales como: contaminación de aislamiento, ramas sobre conductores, descargas atmosféricas, choques de vehículos en los postes, etc., sin embargo en el sistema subterráneo se presenta otro tipo de problemas, tales como: daños mecánicos a cables provocados durante excavaciones, degradación del aislamiento de los cables por varias causas, acidez y corrosión en los alambres de los cables subterráneos y en los tanques de equipo sumergible.

Los factores determinantes para la decisión de seleccionar sistemas aéreos o subterráneos en áreas residenciales, comerciales y turísticas son:

- a) Densidad de carga.
- b) Confiabilidad.
- c) Estética.
- d) Recursos materiales.
- e) Costos de operación y mantenimiento.

RED MIXTA. Existe la distribución de red mixta la cual es una combinación entre la red aérea y subterránea, ya que efectúa la distribución de los alimentadores primarios de manera aérea y la de los alimentadores secundarios directamente enterrados en el suelo. Este tipo de distribución presenta la ventaja de reducir las posibilidades de fallas en la red secundaria.

Atendiendo su operación las redes se clasifican en:

- 1) Red radial.
- 2) Red en paralelo ó Automática

En sistemas de distribución primaria radial, lleva la energía desde los buses de las subestaciones de distribución a los transformadores que se conectan para alimentar las cargas que están dentro del área en servicio. Este sistema se divide en dos tipos, el más simple y usado con mayor frecuencia, es el tipo de alimentador radial en forma de árbol que consta de una troncal y varios ramales, la mayor densidad de corriente en el alimentador, se localiza en el tramo de la subestación al primer transformador de distribución conectado, o en su defecto a la primera ramal lateral. De lo anterior se desprende que la corriente en la línea va disminuyendo hacia el extremo final del alimentador, por lo que teóricamente el calibre de los conductores podría irse reduciendo, sin embargo en la práctica la reducción del calibre queda en función de la regulación de voltaje y de cambio futuro en la red, por lo que el alimentador usualmente consiste de un mayor calibre en la troncal, cerca de la subestación, con algunos calibres menores en los ramales laterales.

El alimentador de tipo árbol de distribución radial primaria, es típico en áreas donde las cargas pequeñas y espaciadas y el promedio de densidad de carga es bajo, sin embargo se adapta con éxito a las áreas de grandes densidades de carga, siempre y cuando la subestación de distribución se encuentre localizada en el centro del área por servir y los límites de los alimentos se definan lo mejor posible. Este sistema no provee la mejor continuidad del servicio, porque una falla en la troncal suspendería el servicio a todos los consumidores abastecidos por el alimentador. Para proporcionarle flexibilidad para atender fallas y dar mantenimiento se pueden instalar cuchillas seccionadoras y de enlace de operación manual.

El otro tipo es el alimentador con centros de distribución radial para el cual el área que se va a servir debe seleccionarse con límites bien definidos, ese tipo consta de un alimentador o línea principal que va desde la subestación a un centro de distribución del área sin tener ninguna carga conectada en este tramo. Del centro de distribución salen los ramales en las direcciones necesarias para alimentar las cargas a lo largo de cada una de las calles del área seleccionada previamente. Este tipo radial está más evolucionado que el radial arborecente, siendo su empleo más ventajoso en las zonas de alta densidad de carga en las ciudades y en general en áreas de cargas concentradas.

La figura 1.2 muestra ambos tipos de alimentadores radiales.

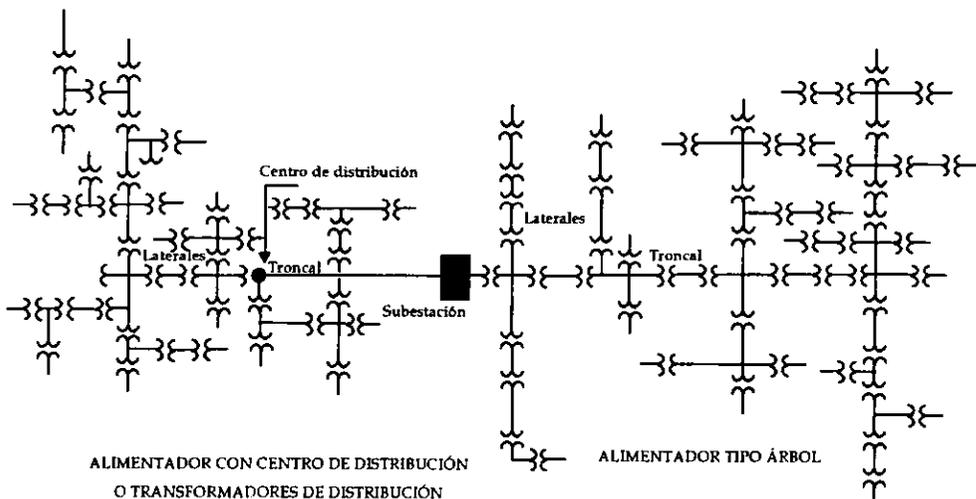


FIGURA 1.2

El sistema de distribución primaria de red en paralelo o automática es conveniente para muy altas densidades de carga y rigurosa continuidad del servicio.

Una versión simplificada del sistema de red primaria automática en mediana tensión se muestra en la figura 1.3.

Cada alimentador va a un centro de carga seleccionado, en forma parecida al sistema radial tipo centro de distribución, sólo que en este caso todos los alimentadores principales se interconectan para formar una malla o red, en síntesis, se instala interruptores en los conductos primarios principales de la red a cada uno de los lados de sus derivaciones importantes.

La red es alimentada, por regla general por dos o más subestaciones que junto con la seccionalización por interruptores y los varios alimentadores que llegan a la red proveen a ésta un grado máximo de continuidad del servicio, lo que hace mas confiable al sistema, pero también, mas costosa su instalación, equipo y mantenimiento.

La continuidad y regulación del voltaje son muy aceptables en el sistema de red automática, otra ventaja de este sistema es la de que en caso de crecimiento de la carga, no es necesario volver a diseñar la red, pues bastará con agregar capacidad a la subestación más próxima al centro de carga del aumento.

En el caso de la red subterránea automática se constituye con varios alimentadores primarios radiales sin enlace entre ellos, que alimentan una serie de transformadores de distribución y los secundarios de estos alimentadores forman una malla de cables trifásicos sólidamente unidos entre sí y de éste se obtienen los servicios para el suministro a los usuarios.

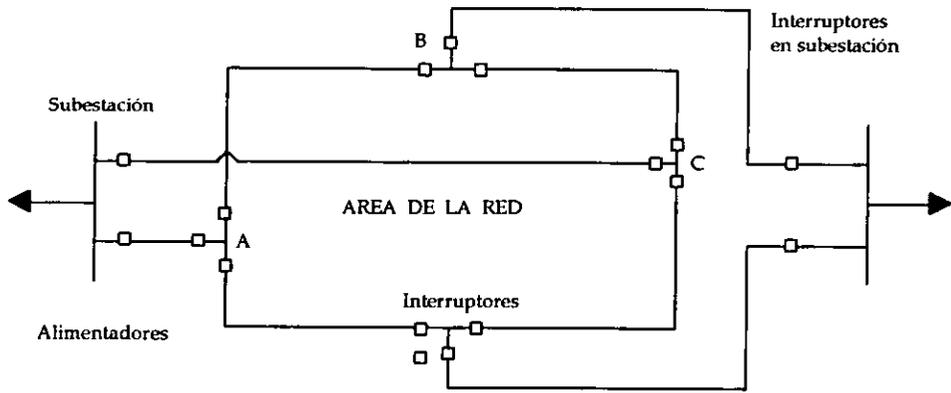


FIGURA 1.3

La red es alimentada, por regla general por dos o más subestaciones que junto con la seccionalización por interruptores y los varios alimentadores que llegan a la red proveen a ésta un grado máximo de continuidad del servicio. Así por ejemplo, considerando la figura anterior, si ocurre una falla entre A y B los interruptores de esa sección se abrirán sacándola del servicio, manteniendo el resto del circuito sin disturbios.

En caso de que la falla ocurriera entre la subestación y el punto A, los interruptores en la subestación y en el punto A se abrirían dejando fuera dicho alimentador sin interrupciones en la red, la cual sigue siendo abastecida por los demás alimentadores.

Suponiendo que una subestación quede fuera de servicio; la otra u otras subestaciones continúan llevando la carga y no había por lo tanto la interrupción en el servicio, la red puede tener ramales laterales conectados a ella en forma similar al sistema radial.

La red de alimentadores primarios se diseña de tal manera que pueda absorberse un aumento de carga aún con la falta de uno de ellos.

Cuando ocurre una falla en la red de baja tensión, el cortocircuito queda alimentado por la capacidad combinada de todos los transformadores, provocándose una corriente de cortocircuito suficiente para fundir en ese lugar el conductor de cobre, quemándose generalmente una reducida porción de su longitud y en corto tiempo, lo cual no da oportunidad para que se produzcan daños de consideración en los aislamientos del resto del cable, quedando así aislada la falla sin provocar interrupciones.

La figura 1.4 ilustra una red en paralelo o automática de 3 alimentadores.

De los métodos anteriores, que son los fundamentales, se derivan otros por medio de combinaciones adecuadas y necesarias a la clase de servicio que se va a alimentar.

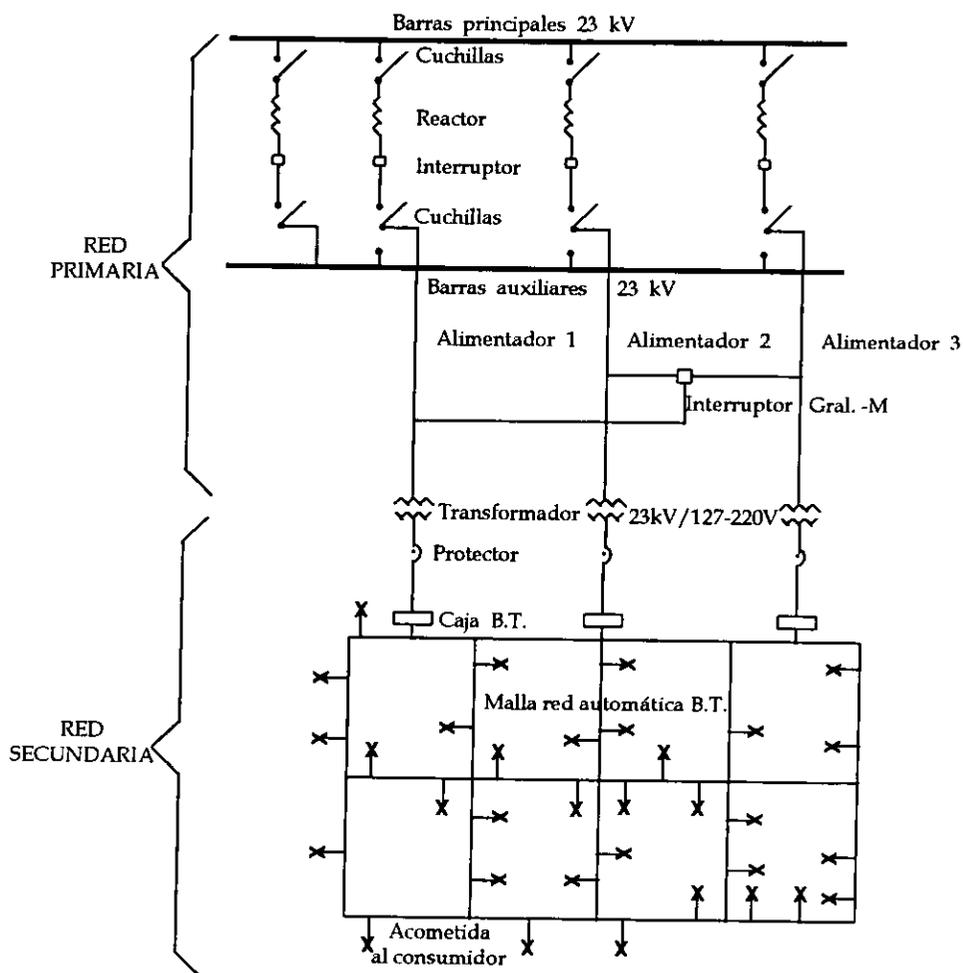


FIGURA 14

TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN.

La función de los transformadores de distribución es reducir la tensión con la que operan los circuitos de alimentadores primarios a la de utilización que es suministrada por los circuitos de alimentadores secundarios.

La capacidad de un transformador estará definida en función del valor de la carga que va a alimentar, del tipo de red en la zona, y del porcentaje de reserva en la capacidad del transformador que requiera para su alimentación.

Los transformadores de distribución se instalan normalmente en 45, 75, 112.5, 150 y 225 KVA en instalaciones aéreas de 23 KV, los cuales se conectan a la red primaria de distribución mediante fusibles y apartarrayos como equipo de protección contra fallas de cortocircuito y sobrecarga.

RED DE DISTRIBUCIÓN SECUNDARIA

Los circuitos de alimentadores secundarios son el último paso de un sistema de distribución estrictamente hablando, ya que su función es llevar la energía eléctrica de los transformadores de distribución hasta los aparatos de medición de consumidor.

Para su diseño tomar en cuenta: la caída de tensión por fase, el porcentaje de pérdidas, el factor de potencia de la carga, etcétera, para poder contar con una operación de la red económica y eficiente.

La tensión de los circuitos de alimentadores secundarios es normalmente de 220 entre fases y de 127.5 entre una fase y neutro, siendo estas las tensiones en que comúnmente se suministra el servicio al comercio, pequeños talleres y zonas residenciales.

A fin de contar con una mayor confiabilidad en el servicio se instalan formando una malla que permite varios caminos para el flujo de la energía eléctrica del transformador de distribución a la carga por alimentar.

En la protección en baja tensión para proteger al transformar se requieren limitadores de corriente.

SUMINISTRO Y APARATOS DE MEDICIÓN AL CONSUMIDOR

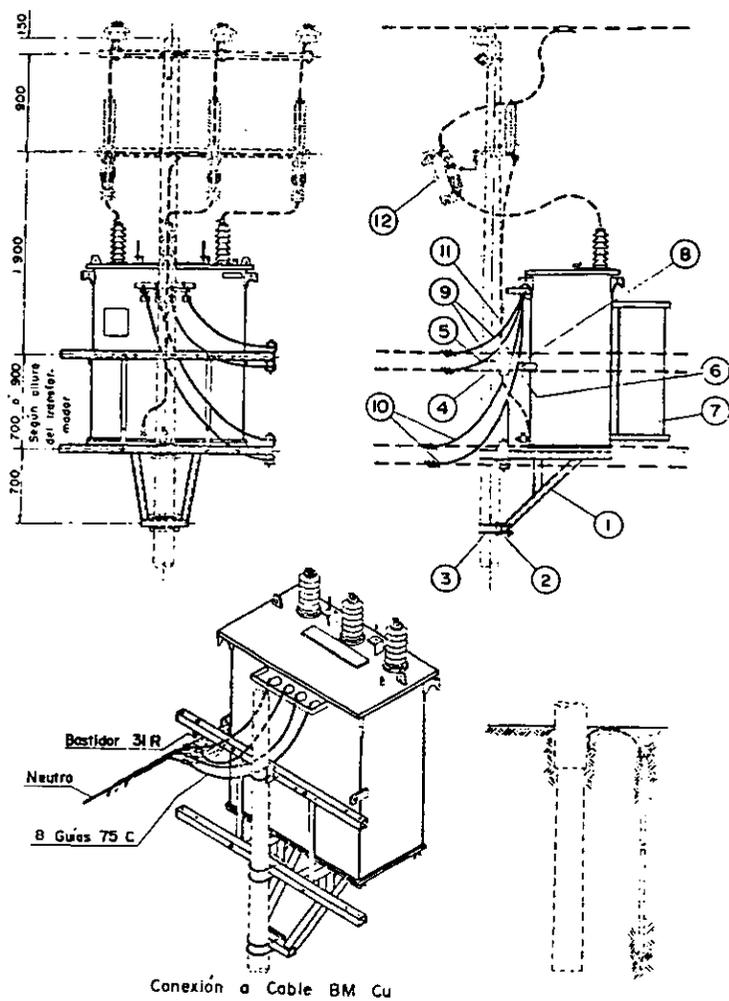
El suministro y la medición puede efectuarse tanto en baja (alimentadores secundarios) como en alta tensión (alimentadores primarios) según sean las características de la carga. La diferencia entre estos servicios será la alternativa de poder medir en el lado de alta (primario) o baja tensión (secundario) del transformador de distribución. Se pueden encontrar los casos siguientes:

1. La demanda del cliente es menor de 20 KW, se le mide en baja tensión.
2. La demanda del cliente es mayor de 20 KW y solicita servicio en baja tensión, se le mide en baja tensión.
3. La demanda del cliente es mayor de 20 KW y solicita servicio en alta tensión y que se le mida en baja tensión.
4. La demanda del cliente es mayor de 20 KW, solicita servicio en alta tensión y que se le mida en alta tensión.

El número de fases en la acometida depende del valor de la demanda probable, resumiéndose en los casos siguientes:

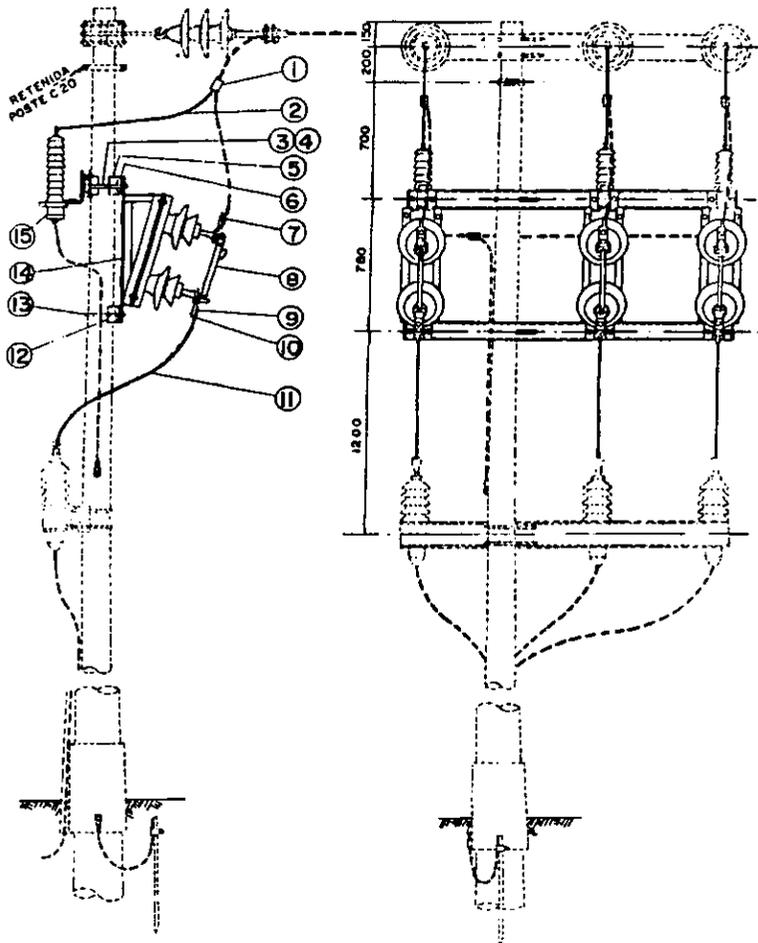
DEMANDA PROBABLE			No. DE FASES
DESDE	HASTA	MÁXIMA	
Mínima	- 2 500	- 5 000 W	1
2 500	- 5 000	- 10 000 W	2
5 000	- 10 000	- 20 000 W ó más	3

TRANSFORMADOR POSTE 23 B 150

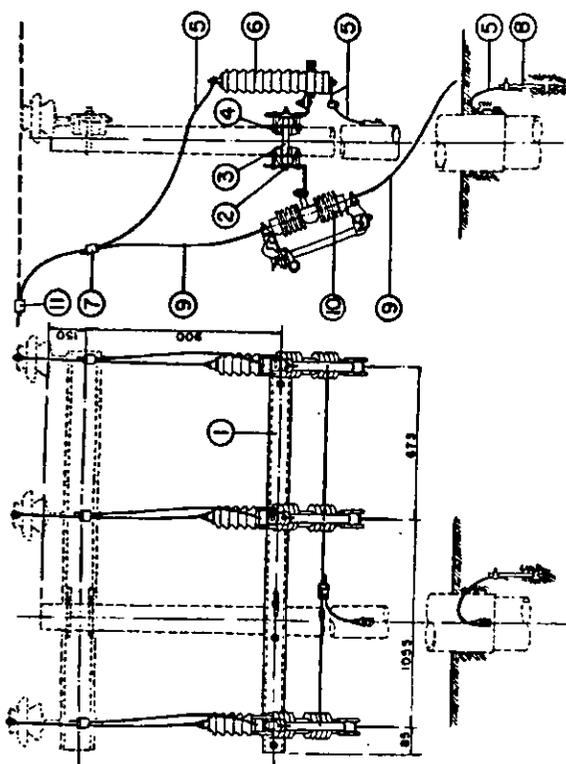


TRANSFORMADOR POSTE 23 B 150				
				2 de 2
REF.	NOMBRE	NORMA LyF	UNIDAD	CANTIDAD
1	Plataforma Transformador Poste	2.0509	Pza.	1
2	Dado 6.180	2.0497	Pza.	2
3	Abrazadera 180 U	2.0498	Pza.	4
4	Dado 6.150	2.0497	Pza.	1
5	Abrazadera 5.160	2.0498	Pza.	1
6	Tomillo Ojo 5/8 x 7	2.0188	Pza.	2
7	Transformador Poste 23 B 150	2.0229	Pza.	1
8	Cable Acero Galvanizado 5/16	2.009	m	10
9	Cable Guía Transformador 75 C	2.1957.10	Pza.	4
10	Cable Guía Transformador 75 L	2.1957.10	Pza.	4
11	Cable Cud 1/0	2.0102	m	5
12	Fusible 23 - 6 K - SC - SMD 20	2.0137	Pza.	3
<p>APLICACION:</p> <p>Instalado en poste A 13 con un montaje PUESTA A TIERRA POSTE A y conectado a líneas de 23 KV, utilizando un montaje PORTAFUSIBLES 23 PARARRAYOS 23, transforma la energía de redes primarias de 23 KV a 220 V entre fases y 127 V al neutro, para eliminar redes y servicios de baja tensión.</p>				
<p>CLAVE DEL NOMBRE:</p> <p>23 - 23,000 Volts 8 - Baja tensión 150 - 150 KVA</p>				
Oct 79	Rev:			

MONTAJE
CUCHILLAS 23V PARARRAYOS 23



MONTAJE
PARARRAYOS PORTAFUSIBLES 23



**MONTAJE
PARARRAYOS PORTAFUSIBLES 23**

1 de 2

REF.	CANT.	UNIDAD	NOMBRE	NORMA	FOLIO
1	2	Pza	CRUCETA 40	2.3100.09	
2	4	Pza	TORNILLO MAQ 5/8 x 11 ó 5/8 x 12	2.9250.10	
3	2	Pza	SEPARADOR		
4	2	Pza	DADO 45, 46 Ó 47	2.3350.10	
5	15	m	CABLE CUD 1/0	2.1956.20	
6	3	Pza	PARARRAYOS 23	1.7010.23	
7	3	Pza	CONECTOR CANAL C 2/0 - 4 Cu	2.9200.11	
8	1	Pza	TIERRA 1	2.0700.15	
9	10	m	ALAMBRE Cud 4	2.7650.67	
10	3	Pza	PORTAFUSIBLES 23220	2.2848.75	
11	3	Pza	CONECTOR CANAL E 1/0-1/0 A1, 4/0-2/0 A1, Ó CONECTOR CANAL S 336 - 1/0 A1	2.2848.80	

USO:

- 1.- Instalado con montajes TRANSFORMADOR POSTE 23 - (KVA) conecta al transformador con la línea de 23 KV protegiéndolo contra sobretensiones y sobrecorrientes, en zonas alejadas del centro de la Ciudad.
- 2.- Instalado en poste A o C con un montaje SOPORTE TERMINALES 23, permite ejecutar acometidas de cables subterráneos para servicios en 23 KV, según montaje TERMINAL 23 1x35 - 70 PT ACOMETIDA EN POSTE.

CLAVE DEL NOMBRE:

23 - 23,000 Volts

Feb 72 Rev: Dic 72

CAPITULO II

ASPECTOS QUE RIGEN EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN

El análisis de una red de distribución requiere mejorar un gran número de variables que permitan conocer el comportamiento de la red, el cual de una manera elemental se refleja en el valor de la tensión a los usuarios y el valor de la corriente en distintos puntos de la red, lo que son función de la magnitud de la carga, del área servida, de la tensión de alimentación, etcétera. Una ayuda valiosa para llevar a cabo este análisis, es el uso de figuras geométricas que representan las zonas de la influencia de los alimentadores. Aún cuando las áreas que sirven los alimentos no se presentan en formas geométricas regulares, ésta simplificación permite conocer el efecto que causa en la red el cambio de uno de los parámetros, tal como: el cambio de la tensión de alimentación, el crecimiento de la carga, el cambio de calibre de los conductores, etcétera.

Las consideraciones asumidas en este desarrollo son que la densidad de carga es uniforme y que el área de influencia del alimentador es un rectángulo. Las restricciones están representadas por el límite de caída de tensión permitiendo y por la máxima temperatura de operación de los cables; es decir las dos restricciones son el límite de regulación y el límite térmico.

Partiendo de estas condiciones se encuentran las relaciones matemáticas existentes entre los parámetros involucrados; en la primera parte del análisis se efectúa el desarrollo de las ecuaciones generales con restricción por caída de tensión y en la segunda parte se establecen las ecuaciones con restricción por límite térmico.

II.1 DESARROLLO DE LAS ECUACIONES GENERALES PARA CIRCUITOS CON RESTRICCIÓN POR CAÍDA DE TENSIÓN

Considérese un alimentador de forma regular tal como el de la figura 2.1, en el que la troncal y ramales son trifásicos a tres hilos, y la carga esta balanceada en la tres fases.

Denominado:

- A= Area de la zona de influencia del alimentador (Km²).
- a= Base del rectángulo (Km).
- c= Mitad de la altura
- D= Densidad de la carga (KVA/Km²)
- d= Separación entre ramales (Km)
- E= Tensión entre fases (KV)
- I= Corriente del alimentador a la salida de la subestación (Amperes).
- I_r= Corriente en cada ramal (Amperes).
- W= Carga total en el alimentador (KVA).
- W_r= Carga en cada ramal (KVA).
- z₁= Impedancia unitaria de la troncal (ohms/Km).
- z₂= Impedancia unitaria de los ramales (ohms/Km).

La caída de tensión en la troncal del alimentador, en volts considerado la carga (W) concentrada a la mitad de la troncal:

$$V = RI \cos \phi + XI \sin \phi$$

en donde: $Z = R \cos \phi + X \sin \phi$

o sea: $V = Iz$

ALIMENTADOR CUYA ZONA DE INFLUENCIA ES RECTANGULAR

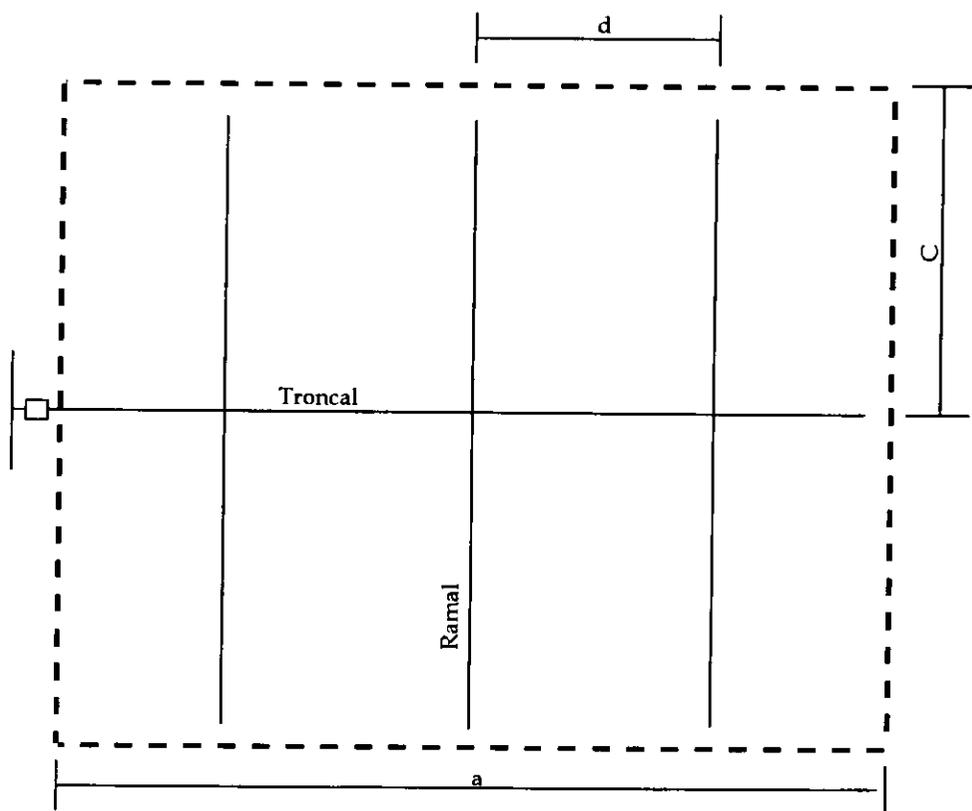


FIGURA 2.1

Ahora si W esta conectada a la mitad del rectángulo y la fase del rectángulo es la longitud de la troncal del alimentador tenemos:

$$V = \left(\frac{1}{2} a\right) Iz \quad \dots (2.1)$$

$$V_1 = \frac{z_1 a}{2} I$$

el área de la zona de influencia del alimentador por se de forma rectangular, esta dada por:

$$A = 2 ac \quad \dots (2.2)$$

y el valor de la carga en funcion del área y de la densidad de carga:

$$W = AD = 2acD \quad \dots (2.3)$$

la corriente en amperes a la salida de la subestación:

$$I = \frac{W}{\sqrt{3} E} = \frac{2acD}{\sqrt{3} E} \quad \dots (2.4)$$

de la ecuación (2.1) la caída de tensión V_1 en la troncal es:

$$V_1 = \frac{z_1 a}{2} \frac{2acD}{\sqrt{3} E}$$

$$V_1 = \frac{a^2 c D z_1}{\sqrt{3} E} \quad \dots (2.5)$$

expresando la caída de tensión V_1 en porciento , en función de la tensión nominal del alimentador:

$$\% V_1 = \frac{\sqrt{3} V_1}{E} 100$$

como E esta en kV y V1 en volts tendremos:

$$\% V_1 = \frac{\sqrt{3} V_1 100}{E 1000}$$

sustituyendo V 1 de la ecuación (2.5) se tiene:

$$\% V_1 = \frac{\sqrt{3} \left(\frac{a^2 c D z_1}{\sqrt{3} E} \right) 100}{E 1000}$$

$$\% V_1 = \frac{0.1 a^2 c D z_1}{E^2} \quad \dots (2.6)$$

En la figura 2.1 se puede observar que al número total de derivaciones o ramales se da por la relación:

$$A = 2 a c \quad \therefore \quad c = \frac{A}{2a}$$

$$A_r = d c \quad \therefore \quad c = \frac{A_r}{2a}$$

$A_r =$ Area del ramal

igualando

$$\frac{A}{2a} = \frac{A_r}{d}$$

... (2.7)

$$\frac{A}{A_r} = \frac{2a}{d} = n = \text{número de ramales}$$

En base a esto se puede escribir la ecuación que determina el valor de la corriente I, en cada ramal, en función de los parámetros geométricos, de la tensión E y de la densidad de carga D. La carga W_r en cada derivación es entonces:

$$W_r = \frac{W}{n} = \frac{W}{\frac{2a}{d}} = \frac{Wd}{2a}$$

De la ecuación (2.3) se tiene:

$$W_r = \frac{2acDd}{2a} \quad \dots(2.8)$$

$$W_r = cdD$$

Luego la corriente en cada ramal:

$$I_r = \frac{W}{\sqrt{3} E} \quad \dots(2.9)$$

$$I_r = \frac{cdD}{\sqrt{3} E}$$

En este caso por tratarse de un circuito trifásico a tres hilos la impedancia total es igual a z_2c ; la caída de tensión V_2 en cada ramal, considerando la carga total I_r conectada a la mitad de su longitud:

$$V_2 = \frac{1}{2} (I_r z_2 c) \quad \dots(2.10)$$

sustituyendo I_r de la ecuación (2.9) tenemos:

$$V_2 = \frac{Dc^2 d z_2}{2 \sqrt{3} E} \quad \dots(2.11)$$

expresando la caída de tensión V_2 en porciento de la tensión nominal E del alimentador:

$$\% V_2 = \frac{\sqrt{3} V_2 100}{E 1000} = \frac{Dc^2 d z_2}{2 \sqrt{3} E} \frac{\sqrt{3} 100}{E 1000}$$

$$\% V_2 = \frac{0.05 Dc^2 d z_2}{E^2} \quad \dots(2.12)$$

así la caída en el alimentador es igual a la caída en el troncal más la caída en el ramal:

$$\% V = \frac{0.1 a^2 c D z_1}{E^2} + \frac{0.05 c^2 d D z_2}{E^2} \quad \dots(2.13)$$

si se considera que un circuito dado, la densidad de carga D , el calibre del conductor z_1 y z_2 , la separación entre ramales d y la tensión E son constantes, la ecuación anterior se puede simplificar de la siguiente manera:

$$\% V = K_1 a^2 c + K_2 c^2 \quad \dots(2.14)$$

en donde

$$K_1 = \frac{0.1 D z_1}{E^2} \quad \dots(2.15)$$

$$K_2 = \frac{0.05 d D z_2}{E^2} \quad \dots(2.16)$$

quedando entonces la expresión en función solamente de las características geométricas del área cubierta por el alimentador (a y c).

A partir de esta expresión se puede determinar la relación entre a y c , que da la máxima área cubierta por un alimentador, con una caída de tensión limitada a un cierto valor. Es decir que el porcentaje de caída de $\%V$, es igual a una constante K_3 . En base a esto de la ecuación (2.14):

$$K_3 = k_1 a^2 c + k_2 c^2 \quad \dots(2.17)$$

despejando "a" se tiene:

$$a = \left(\frac{k_3 - k_2 c^2}{k_1 c} \right)^{1/2}$$

pero de la ecuación (2.2) sabemos que $A=2ac$, luego:

$$A = 2c \left(\frac{k_3 - k_2 c^2}{k_1 c} \right)^{1/2} \quad \dots(2.18)$$

derivando con respecto a la variable c e introduciendo $2c$ en el radical, e igualando a cero tenemos:

$$\begin{aligned}\frac{dA}{dc} &= \frac{d}{dc} \left(\frac{4c^2k_3 - 4c^4k_2}{k_1c} \right)^{1/2} = 0 \\ &= \frac{d}{dc} \left(\frac{4ck_3 - 4c^3k_2}{k_1} \right)^{1/2} \\ \frac{dA}{dc} &= \frac{1}{2} \left(\frac{4ck_3 - 4c^3k_2}{k_1} \right)^{-1/2} \frac{4k_3 - 12c^2k_2}{k_1} = 0\end{aligned}$$

se puede observar que esta ecuación se hace cero cuando $4k_3$ es igual a $12c^2k_2$, entonces:

$$\begin{aligned}4k_3 &= 12c^2k_2 \\ \frac{k_3}{3} &= c^2k_2\end{aligned}\quad \dots(2.19)$$

Sabiendo que k_2c^2 es el porcentaje de caída de las derivaciones, ecuación (2.14), se puede afirmar entonces que en un alimentador, cuya zona de influencia se rectangular, se área es máxima cuando la tercera parte de la caída total permisible ocurre en los ramales y dos terceras partes en la troncal, es decir:

$$\% V_1 = \frac{2}{3} V(\%)$$

$$\% V_2 = \frac{1}{3} V(\%)$$

En sistema de distribución generalmente se considera 3 % de caída de voltaje en el circuito primario, bajo esta condición se puede determinar el valor de a y c de la máxima área cubierta cuando:

$$\% V = 3 \quad \dots(2.20)$$

$$\% V_1 = 2 \quad \dots(2.21)$$

$$\% V_2 = 1 \quad \dots(2.22)$$

Así la expresión (2.22):

$$\% V_2 = k_2 c^2 = 1 \quad \dots(2.23)$$

$$c = \frac{1}{k_2^{1/2}}$$

el valor de la variable "a" se obtiene substituyendo en la ecuación 2.14 el valor de "c":

$$\% V = k_1 a^2 \frac{1}{K_2^{1/2}} + K_2 \frac{1}{K_2}$$

$$\% V = a^2 \frac{1}{K_2^{1/2}} + 1$$

Dado que la caída de total en porcentaje % V es igual a 3, según la expresión (2.20) esta última ecuación se convierte en:

$$3 = a^2 \frac{k_1}{K_2^{1/2}} + 1 \quad \longrightarrow \quad 3-1 = a^2 \frac{k_1}{K_2^{1/2}}$$

$$a = \frac{\sqrt{2} k_2^{1/4}}{K_2^{1/2}} \quad \dots(2.24)$$

sustituyendo de las ecuaciones (2.15) y (2.16):

$$a = \frac{\sqrt{2E} (0.05 d D z_2)^{1/4}}{(0.1 D z_1)^{1/2}} \quad \dots(2.25)$$

la relación entre los lados del rectángulo que cubre el alimetador de las ecuaciones (2.23) y (2.24):

$$\frac{a}{c} = \sqrt{2} \frac{k_2^{3/4}}{k_1^{1/2}} \quad \dots(2.26)$$

la máxima área cubierta es:

$$A = 2 ac = \frac{2 \sqrt{2}}{k_1^{1/2} k_2^{1/4}} \quad \dots(2.27)$$

y la carga del alimentador es:

$$W = Da = \frac{2 \sqrt{2D}}{k_1^{1/2} k_2^{1/4}} \quad \dots(2.28)$$

EJEMPLO 2.1

En un alimentador de 23 kV de forma rectangular similar al de la figura 2.1 cuya densidad de carga es de 10 MVA / km², la separación entre ramales d es igual a 0.5 km, la troncal del alimentador tiene una impedancia de $z_1 = 0.4$ ohms/km y los ramales $z_2 = 0.7$ ohms/km. Determinar :

- a) El valor de a y c que permite tener el máximo valor del área cubierta, cuando la caída de tensión en el primario es igual a 3%.
- b) La relación a/c .
- c) El área de influencia del alimentador.
- d) La carga W del alimentador.
- e) El número de ramales.
- f) La caída de tensión en la troncal a los ramales.

Solución:

$$E = 23 \text{ kV}$$

$$D = 10\,000 \text{ kVA/km}^2$$

$$d = 0.5 \text{ km}$$

$$z_1 = 0.4 \text{ ohms/km}$$

$$z_2 = 0.7 \text{ ohms/km}$$

$$k_1 = \frac{0.1 D z_1}{E^2} = \frac{0.1 (10\ 000) 0.4}{(23)^2} = 0.7561$$

$$k_2 = \frac{0.05 d D z_2}{E^2} = \frac{0.05 (0.5) (10\ 000) (0.7)}{(23)^2} = 0.3308$$

a) El valor de a y c:

$$a = \frac{\sqrt{2} k_2^{1/4}}{k_1^{1/2}} = \frac{\sqrt{2} (0.3308)^{1/4}}{(0.7561)^{1/2}} = 1.23 \text{ km}$$

$$c = \frac{1}{k_1^{1/2}} = \frac{1}{(0.3308)^{1/2}} = 1.73 \text{ km}$$

b) La relación a/c:

$$\frac{a}{c} = \frac{1.23}{1.73} = 0.71$$

c) El área de influencia del alimentador:

$$A = 2ac = 2 (1.23) (1.73) = 4.25 \text{ km}^2$$

d) La carga W del alimentador:

$$W = DA = (10\ 000) (4.24) = 42\ 500 \text{ kVA}$$

e) El número de ramales:

$$n = \frac{2a}{d} = \frac{2 (1.23)}{0.5} = 4.92 \text{ ramales}$$

f) La caída de tensión en la troncal y los ramales:

$$\begin{aligned} \% V &= k_1 a^2 c + k_2 c^2 \\ &= 0.7561 (1.23)^2 (1.73) + 0.3308 (1.73)^2 \\ &= 1.9789 + 0.99 \\ &= 2.96 \% \end{aligned}$$

II.2 EFECTO DEL AUMENTO DE TENSIÓN EN ALIMENTADORES CON RESTRICCIÓN POR CAÍDA DE TENSIÓN

Otra aplicación de las relaciones obtenidas en el punto anterior es su aplicación objeto de mostrar como se afecta la geometría de la máxima área de carga, cuando se cambia la tensión E del alimentador, manteniendo invariable la densidad de carga D , la separación entre ramales d y la impedancia de los cables z_1 y z_2 . Esto permite en un momento dado, establecer no solo que tensión de alimentación es conveniente sino además que beneficios se obtienen en la zona de distribución con este cambio, menor caída de tensión, menos pérdidas, etcétera.

El valor de c para la tensión E_1 , cuando el porcentaje de caída en la troncal es igual a 2% y 1% en los ramales, de las ecuaciones (2.16) y (2.33) se tiene sustituyendo:

$$c_1 = \frac{E_1}{(0.05 dDz_2)^{1/2}} \quad \dots (2.29)$$

para el nuevo valor de E_2 , permitiendo constantes los demás parámetros.

$$c_2 = \frac{E_2}{(0.05 dDz_2)^{1/2}} \quad \dots (2.30)$$

dividiendo estas dos ecuaciones:

$$\frac{c_2}{c_1} = \frac{E_2}{E_1} \quad \dots (2.31)$$

el valor de la base a_1 del rectángulo de influencia del alimentador con la tensión E_1 , de la ecuación (2.24):

$$a_1 = \frac{\sqrt{2} k_2^{1/4}}{k_1^{1/2}}$$

sustituyendo valores de k_1 y k_2 :

$$a_1 = \sqrt{2} E_1 \frac{(0.05 dDz_2)^{1/4}}{(0.1 Dz_1)^{1/2}}$$

si:

$$k = \frac{(0.05 dDz_2)^{1/4}}{(0.1 Dz_1)^{1/2}}$$

tenemos:

$$a_1 = \sqrt{2} E_1 k \quad \dots (2.32)$$

para la nueva tensión E_2 la base del rectángulo de la zona de influencia del alimentador:

$$a_2 = \sqrt{2} E_2 k \quad \dots (2.33)$$

la relación a_1 / a_2 :

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{\sqrt{E_1}}{\sqrt{E_2}} = \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{1/2} \quad \dots (2.34)$$

de la ecuación (2.2) la relación de las áreas de carga está dada por:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{2a_1 c_1}{2a_2 c_2} \quad \dots (2.35)$$

si sustituimos valores de las expresiones (2.31) y (2.34) tendremos:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{2 a_2 \sqrt{E_1} \frac{E_1 c_2}{E_2}}{2 a_2 c_2} \quad \dots (2.36)$$

$$\frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{3/2}$$

la carga por circuito de la expresión (2.3):

$$W_1 = A_1 D$$

$$W_2 = A_2 D$$

dividiendo y sustituyendo valores de (2.36):

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{A_1 D}{A_2 D} = \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{3/2} \quad \dots (2.37)$$

la relación del número de derivaciones n_1/n_2 esta dada de la expresión (2.7) por:

$$n_1 = \frac{2a_1}{d}$$

$$n_2 = \frac{2a_2}{d}$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\frac{2a_1}{d}}{\frac{2a_2}{d}} = \frac{a_1}{a_2}$$

de la expresión (2.34) se tiene:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{a_1}{a_2} = \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{1/2} \quad \dots(2.38)$$

EJEMPLO 2.2

Para el alimentador del ejemplo anterior, con una tensión $E = 34,5$ kV, determine los nuevos valores de a , c , A , W y n ; permaneciendo constantes la densidad de carga D , la separación entre ramales, y la impedancia de los cables z_1 y z_2 .

Compruebe que con estos nuevos valores $\%V = 3\%$

Solución:

$$E_1 = 23 \text{ kV}$$

$$a_1 = 1.23 \text{ km}$$

$$c_1 = 1.73 \text{ km}$$

$$A_1 = 4.25 \text{ km}^2$$

$$W_1 = 42\,500 \text{ kVA}$$

$$n_1 = 4.92 \text{ ramales}$$

$$E_2 = 34.5 \text{ kV}$$

$$D = 10\,000 \text{ kVA/km}^2$$

$$d = 0.5 \text{ km}$$

$$z_1 = 0.4 \text{ ohms/km}$$

$$z_2 = 0.7 \text{ ohms/km}$$

$$a_2 = \frac{a_1 \sqrt{E_2}}{\sqrt{E_1}} = \frac{1.23 \sqrt{34.5}}{\sqrt{23}} = 1.506 \text{ km}$$

$$c_2 = \frac{c_1 c_2}{E_1} = \frac{1.73 (34.5)}{23} = 2.59 \text{ km}$$

$$A_2 = A_1 \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^{3/2} = 7.8 \text{ km}^2$$

de otra forma:

$$A_2 = 2a_2 c_2 = 2 (1.506) 2.59 = 7.8 \text{ km}^2$$

$$W_2 = A_2 D = 7.8 (10\ 000) = 78\ 000 \text{ kVA/km}^2$$

$$n_2 = \frac{2a_2}{d} = \frac{2(1.506)}{0.5} = 6.024 \text{ ramales}$$

El porcentaje de caída de tensión:

$$\% V = \frac{0.1 a_2^2 c_2 Dz_1}{E_2^2} + \frac{0.05 c_2^2 d Dz_2}{E_2^2}$$

$$\% V = \frac{0.1 (1.506)^2 (2.59) 10\ 000 (0.4)}{(34.5)^2} + \frac{0.05 (2.59)^2 (0.5) 10\ 000 (0.7)}{(34.5)^2}$$

$$\% V = 1.97 + 0.98 = 2.96\% \approx 3.00\%$$

II.3 DESARROLLO DE LAS ECUACIONES GENERALES CON RESTRICCIÓN TÉRMICA

En esta parte se desarrollan las ecuaciones generales para los circuitos en los que la caída de tensión no es su límite, sino su capacidad térmica, es decir que en este caso la educación de las ecuaciones se lleva a cabo manteniendo W constante que es función de la corriente y al estar ésta limitada, se limita a la temperatura.

De la ecuación general (2.14) se tiene:

$$\%V = K_1 a^2 c + k_2 c^2$$

dado que la carga en función del área y la densidad de carga es:

$$W = AD = 2acD$$

dejando a:

$$a = \frac{W}{2c D}$$

sustituyendo el valor de a en la ecuación general de $\%V$ (2.14) tenemos:

$$\%V = k_1 \frac{W^2}{4c D^2} + k_2 c^2 \quad \text{..(2.39)}$$

derivando esta ecuación con respecto a la variable c e igualando a cero para tener el máximo valor de c , ante esta restricción se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dc} &= \frac{d}{dc} \left(k_1 \frac{W^2}{4c D^2} + k_2 c^2 \right) = 0 \\ &= k_1 \frac{W^2}{4 D^2} \frac{d}{dc} \left(\frac{1}{c} \right) + k_2 \frac{d}{dc} (c)^2 = 0 \\ &= - k_1 \frac{W^2}{4c^2 D^2} + 2 k_2 c = 0 \end{aligned}$$

despejando la variable c:

$$c = \left(\frac{k_1 W^2}{8k_2 D^2} \right)^{1/3} \quad \dots(2.40)$$

sustituyendo este valor de c en la expresión general de la carga, ecuación (2.3) y despejando a la variable "a" se tiene:

$$a = \frac{W}{2cD} = \frac{W}{2D} \left(\frac{8 k_2 D^2}{k_1 W^2} \right)^{1/3}$$

introduciendo $W / 2D$ al paréntesis:

$$a = \left(\frac{k_2 W}{k_1 D} \right)^{1/3} \quad \dots(2.41)$$

la relación a/c se tiene:

$$\frac{a}{c} = \left(\frac{k_2 W}{k_1 D} \right)^{1/3} \left(\frac{8 k_2 D^2}{k_1 W^2} \right)^{1/3}$$

$$\frac{a}{c} = 2 \left(\frac{k_2}{k_1} \right)^{2/3} \left(\frac{D}{W} \right)^{1/3} \quad \dots(2.42)$$

EJEMPLO 2.3

En un alimentador trifásico, tres hilos en la troncal y una fase, un hilo en los ramales, que trabaja a 23 kV, está limitado térmicamente a $W = 9\,000$ kVA, la densidad de carga en la zona es de $D = 10\,000$ kVA/km², la separación entre ramales es de $d = 0.5$ km y las impedancias en la troncal $z_1 = 0.4$ ohms/km y $z_2 = 0.7$ ohms/km de los ramales, determine:

- Los lados a y c del rectángulo.
- El área de la zona de influencia del alimentador.
- La carga W del alimentador si $D = 10\,000$ kVA/km².
- El porcentaje de caída de tensión en la troncal y en los ramales.

Solución:

$$W = 9\,000 \text{ kVA}$$

$$D = 10\,000 \text{ kVA/km}^2$$

$$d = 0.5 \text{ km}$$

$$z_1 = 0.4 \text{ ohms/km}$$

$$z_2 = 0.7 \text{ ohms/km}$$

$$E = 23 \text{ kV}$$

- Los lados a y c del rectángulo.

Dado que a y c son funciones de k_1 y k_2 determinemos primero estas constantes:

$$k_1 = \frac{0.1 D z_1}{E^2} = \frac{0.1 (10\,000) (0.4)}{(23)^2} = 0.756$$

$$k_2 = \frac{0.05d Dz_2}{E^2} = \frac{0.05 (0.5) (10\,000) (0.7)}{(23)^2} = 0.3308$$

$$a = \left(\frac{k_2 W}{k_1 D} \right)^{1/3} = \left(\frac{0.3308 \times 9\,000}{(0.756)(10\,000)} \right)^{1/3} = 0.7329 \text{ km}$$

$$c = \left(\frac{k_1 W^2}{8k_2 D^2} \right)^{1/3} = \left(\frac{0.756 (9\,000)^2}{8 (0.7329)(10\,000)^2} \right)^{1/3} = 0.4709 \text{ km}$$

b) El área de la zona de influencia del alimentador:

$$A = 2ac = 2 (0.7329) 0.4709 = 0.692 \text{ km}^2$$

c) La carga del alimentador:

$$W = AD = 0.6902 \times 10\,000 = 6902.45 \text{ kVA}$$

que es menor a la restricción térmica señalada en un principio.

d) El %V de caída de tensión en la troncal y en los ramales:

$$\%V = k_1 a^2c + k_2c^2$$

$$\%V = 0.759 (0.7329)^2 0.4709 + 0.3308 (0.4709)^2$$

$$\%V = 0.1912 + 0.0733 = 0.2646\%$$

EJEMPLO 2.4

Determine los valores de a , c , A , W y $\%V$, cuando el alimentador del ejemplo anterior se cambia a 34.5 kV.

Solución.

$$D = 10\,000 \text{ kVA/km}^2$$

$$d = 0.5 \text{ km}^2$$

$$z_1 = 0.4 \text{ ohms/km}$$

$$z_2 = 0.7 \text{ ohms/km}$$

$$E = 34.5 \text{ kV}$$

Al cambiar el voltaje de 23 a 34.5 kV, manteniendo constante la corriente I (restricción térmica) la carga W se incrementa:

$$I = \frac{W}{\sqrt{3} E} = \frac{9\,000}{\sqrt{3} (23)} = 225.9 \text{ Amperes}$$

entonces obtengamos el nuevo valor de W a 34.5 kV:

$$W = \sqrt{3} I E = \sqrt{3} (225.9) (34.5) = 13\,500 \text{ kVA}$$

El valor de las constantes k_1 y k_2 :

$$K_1 = \frac{0.1 D z_1}{E^2} = \frac{0.1 (10\,000) (0.4)}{(34.5)^2} = 0.336$$

$$K_2 = \frac{0.05 d D z_2}{E^2} = \frac{0.05 (0.5) (10\,000) (0.7)}{(34.5)^2} = 0.147$$

$$a = \left(\frac{K_2 W}{K_1 D} \right)^{1/3} = \left(\frac{0.147 \times 13\,500}{0.336 \times 10\,000} \right)^{1/3} = 0.839$$

$$a = \left(\frac{K_1 W^2}{8 K_2 D^2} \right)^{1/3} = \left(\frac{0.336 (13\,500)^2}{8 \times 0.147 (10\,000)^2} \right)^{1/3} = 0.8045$$

el área A:

$$A = 2ac = 2 (0.839) (0.8045) = 1.35 \text{ km}^2$$

la carga W:

$$W = AD = 1.35 \times 10\,000 = 13\,500 \text{ kVA}$$

que es igual al valor máximo de carga que se puede distribuir, de acuerdo con la restricción térmica.

La caída de tensión en la troncal y en los ramales

$$\begin{aligned} \%V &= K_1 a^2c + k_2c^2 \\ &= 0.336 (0.839)^2 0.8045 + 0.147 (0.839)^2 \\ &= 0.1903 + 0.103 \\ \%V &= 0.2937\% \end{aligned}$$

CAPITULO III

COMPORTAMIENTO DE CARGAS A DIFERENTES TENSIONES

En este capítulo nos ocuparemos de efectuar un análisis de las diferentes condiciones que intervienen en el diseño de alimentadores primarios de una red de distribución aérea.

El estudio comparativo comprende las tensiones de 3, 6.6, 13.2, 23 y 34.5 kV por ser éstas las utilizadas en los sistemas de distribución más usuales en la República Mexicana.

Consideramos para estos cálculos las normas de operación y montaje de líneas aéreas de la Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A., para efectos de facilitar los cálculos, suponemos como datos que utilizamos un conductor 385 ALD, un factor de potencia de 0.8 y un arreglo de un sólo circuito en la postería del tipo de montaje en forma horizontal, para lo que corresponde según el conductor usando una impedancia compuesta de una resistencia de 0.19 ohms/km y una reactancia inductiva de 0.34 ohms/km.

El objetivo fundamental es obtener las curvas de % regulación vs distancia y de perdidas de potencia real vs distancia, manteniendo una carga fija de 3 000 kVA, a fin de determinar el comportamiento de un aliementador primario a diferentes tensiones y distancias.

III.1 DESARROLLO DE LA ECUACIÓN PARA CALCULAR LA REGULACIÓN EN ALIMENTADORES PRIMARIOS.

El proporcionar condiciones satisfactorias de tensión a todos los consumidores servidos por una red, hace de la caída de tensión en un alimentador primario un factor importante para el diseño de estos. Por lo anterior debe limitarse la caída de tensión en los alimentadores para que en lo posible la regulación sea pequeña y la tensión no exceda los límites de operación.

La regulación se define como la variación en el valor de la tensión de una línea en su extremo final cuando la carga en este punto varía entre el valor de plena carga y condiciones de vacío, manteniéndose la tensión constante en el extremo inicial de la línea. Así, para obtener el porcentaje de regulación multiplicamos por cien quedando expresada como porcentaje del valor de la tensión en el extremo final a plena carga, es decir:

$$\% \text{ Reg} = \frac{V_o - V_L}{V_L} \times 100 \quad \dots (3.1)$$

donde:

V_o = Tensión en el extremo inicial en condiciones de vacío.

V_L = Tensión en el extremo final.

Cuando la línea se encuentra abierta en el extremo final y no tiene carga conectada, la única corriente que circula es la corriente capacitiva del circuito.

Se consideran líneas cortas hasta 50 km. en líneas aéreas y hasta 10 Km. en cable subterráneos con tensiones moderadas en donde el efecto de la capacitancia es despreciable y el valor de la tensión en el extremo inicial

será prácticamente igual al de la tensión en el extremo final en vacío, por lo tanto $V_o = V_g$, de donde para líneas cortas, que es el caso que nos ocupa se tiene la siguiente deducción:

Suponemos conocidos los módulos de voltaje, la corriente y factor de potencia en el extremo receptor. En la figura 3.1 se verifica, tomando en cuenta que la corriente esta atrasada con respecto al voltaje receptor y por lo tanto el ángulo ϕ_L es negativo.

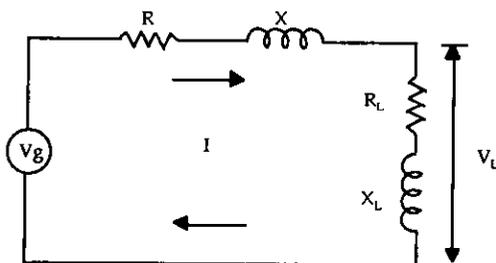


FIGURA 3.1

donde:

V_g = Tensión en el extremo inicial de la línea.

V_L = Tensión en el extremo final de la línea.

Partiendo de:

$$\% \text{ Reg} = \frac{V_g - V_L}{V_L} \times 100$$

$$\% \text{ Reg} = \frac{V_g - V_L}{V_L}$$

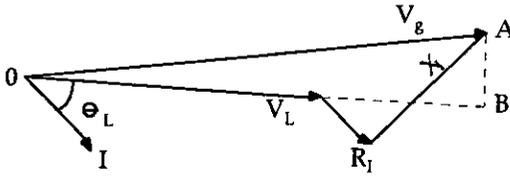


FIGURA 3.2

De la figura anterior 3.2 se tiene:

$$V_g = [(V_L + RI \cos \varnothing_L + XI \operatorname{sen} \varnothing_L)^2 + (XI \cos \varnothing_L - RI \operatorname{sen} \varnothing_L)^2]^{1/2}$$

o sea que V_g es la hipotenusa de un triángulo rectángulo cuyos catetos son $OB = a$ y $BA = b$ (de la figura 3.1) luego:

$$V_g = (a^2 + b^2)^{1/2}$$

el binomio anterior puede desarrollarse en una serie de potencias de la siguiente forma; dividiendo la ecuación entre a y factorizando tenemos:

$$(a^2 + b^2)^{1/2} = \left(\frac{a^2 + b^2}{a} \right)^{1/2} = \left(a + \frac{b^2}{a} \right) = a \left(1 + \frac{b^2}{a^2} \right)^{1/2}$$

$$a \left(1 + \frac{1}{2} \frac{b^2}{a^2} + \dots \right) = a + \frac{b^2}{a^2}$$

como "a" es una línea real, mucho mayor que "b", es suficiente aproximado tomar únicamente los dos primeros términos de la serie.

Sustituyendo en la expresión anterior los valores de a y b :

$$V_g = V_L + RI \cos \varnothing_L + XI \operatorname{sen} \varnothing_L + \frac{(XI \cos \varnothing_L - RI \operatorname{sen} \varnothing_L)^2}{2(V_L + RI \cos \varnothing_L - XI \operatorname{sen} \varnothing_L)}$$

El último término puede despreciarse por ser muy pequeño, por lo que la expresión queda de la siguiente forma:

$$V_g = V_L + RI \cos \varnothing_L + XI \sin \varnothing_L$$

la regulación esta dada por:

$$\frac{V_g - V_L}{V_L} \times 100 = \frac{RI \cos \varnothing_L + XI \sin \varnothing_L}{V_L} \times 100$$

En las expresiones anteriores se considera negativo el ángulo \varnothing_L cuando la corriente esta atrasada con respecto al voltaje final y positivo cuando está adelantada.

$$\text{Si } R = rL$$

$$X = xL$$

siendo r = Resistencia por unidad de longitud de fase (ohms/km)

x = Resistencia inductiva por unidad de longitud por fase (ohms/km).

L = Longitud de línea.

Sustituyendo estos valores en la expresión anterior, se tiene:

$$\% \text{ Reg} = \frac{100 IL}{V_L} (r \cos \varnothing_L + x \sin \varnothing_L) \dots (3.2)$$

Para sistemas de distribución y de acuerdo a cláusulas de contrato que emplea la Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A., se han fijado los limites de regulación de las formas siguientes en base a lo marcado en las normas técnicas para instalaciones eléctricas:

Para líneas de alimentación primaria	4 %
Para líneas de distribución secundaria	3.5 %

III.1 REGULACIÓN SEGÚN EL NIVEL DE TENSIÓN

DETERMINACIÓN DE LA GRAFICA % REGULACIÓN VS DISTANCIA A DIFERENTES TENSIONES

Se mantiene constantes los elementos citados con una carga fija de 3 000 kVA.

Para $V_L = 3 \text{ kV}$

$$V_{\phi} = \frac{3\,000_v}{\sqrt{3}} = 1732 \text{ volts/neutro}$$

$$I = \frac{\text{kVA}}{\sqrt{3} \text{ kV}} = \frac{3\,000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \text{ kV}} = 577 \text{ A.}$$

$$\Delta v = (r \cos \phi + x \sin \phi) IL = (0.19 \times 0.8 + .34 \times 0.6) 577 \text{ L}$$

$$\Delta v = 205.53 \text{ L}$$

$$\% \text{ Reg.} = \frac{\Delta v}{V_{\phi}} \times 100 = \frac{\Delta v}{1732} \times 100$$

L (km)	1	5	10	15	20
% Reg	11.8	59.3	118	178	237.3

Para $V_L = 6.6 \text{ kV}$ tenemos:

$$V_{\phi} = \frac{6600}{\sqrt{3}} = 3810.5$$

$$V_{\phi} = 3\,810.5 \text{ volts/neutro.}$$

$$I = 262.4 \text{ A.}$$

$$\Delta v = 93.42 \text{ L}$$

$$\% \text{ Reg} = (\Delta v / 3\,810.5) 100$$

L (km)	1	5	10	15	20
% Reg	2.45	12.2	24.5	36.7	49

Para $V_L = 13.2$ kV tenemos

$$V_{\phi} = 7\,621 \text{ volts/neutro.}$$

$$I = 131.2 \text{ A.}$$

$$\Delta v = 46.71 \text{ L}$$

$$\% \text{ Reg} = (\Delta v / 7\,621) 100$$

L (km)	1	5	10	15	20
% Reg	0.61	3.06	6.12	9.19	12.25

Para $V_L = 23$ kv tenemos:

$$V_{\phi} = 13\,279 \text{ volts/neutro.}$$

$$I = 75.3 \text{ A.}$$

$$\Delta v = 26.8 \text{ L}$$

$$\% \text{ Reg} = (\Delta v / 13\,279) 100$$

L (km)	1	5	10	15	20
% Reg	0.20	1.0	2.01	3.02	4.03

Para $V_L = 34.5$ kV tenemos:

$$V_{\emptyset} = 19\,918 \text{ volts/neutro.}$$

$$I = 50.2 \text{ A.}$$

$$\Delta v = 17.87 \text{ L}$$

$$\% \text{ Reg} = (\Delta v / 19\,918) 100$$

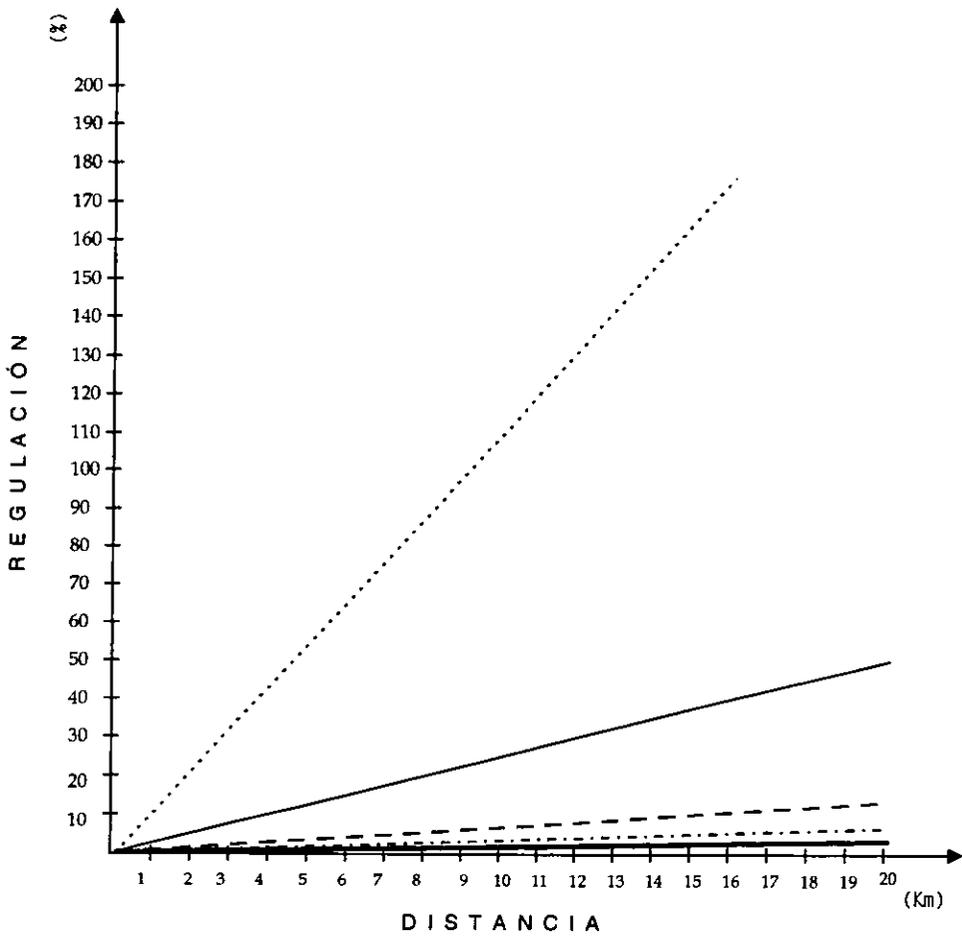
L (km)	1	5	10	15	20
% Reg	0.08	0.44	0.89	1.34	1.79

Con los resultados obtenidos formaremos una tabla del % de regulación correspondiente a cada tensión por distancia y después obtendremos la gráfica III.1.

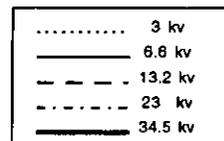
		D I S T A N C I A (K M)				
		1	5	10	15	20
T E N S I O N (K V)	3	11 %	59.3 %	118 %	178 %	237.3 %
	6.6	2.45 %	12.2 %	24.5 %	36.7 %	49 %
	13.2	0.61 %	3.06 %	6.12 %	9.19 %	12.25 %
	23	0.20 %	1.0 %	2.01 %	3.02 %	4.03 %
	34.5	0.08 %	0.44 %	0.89 %	1.34 %	1.79 %

De lo anterior se concluye que la distancia que puede alcanzar un alimentador primario estará determinada por la cantidad de carga y nivel de tensión al que se efectúa la distribución. Así podemos observar que a una carga fija de 3 MVA alimentada a 3 kV la distancia que podemos

GRAFICA III.1



REGULACIÓN Vs DISTANCIA



recorrer con una línea, es reducida; esta condición ha limitado históricamente su uso; por lo anterior se puede apreciar que la tensión de 13.2 kV ofrece parcialmente una mejor respuesta a este problema, sin embargo, las tensiones de 23 y 34.5 kV dan mayores posibilidades para llevar un alimentador primario a mayor distancia tanto en núcleos de población con gran densidad de carga como a aquellos con una densidad de carga reducida y distancia considerable. Esta posibilidad ha hecho de la tensión de 34.5 kV una poderosa herramienta para la distribución rural, pudiéndose ofrecer un mejor servicio en el suministro de la energía eléctrica manteniendo una regulación aceptable.

III.2 PERDIDAS A DIFERENTES TENSIONES

DETERMINACIÓN DE LA GRAFICA DE PERDIDAS DE POTENCIA REAL VS DISTANCIA. A DIFERENTES TENSIONES

Se mantiene constantes los elementos citados con una carga fija de 3 000 KVA

Teniendo $V_L = 3 \text{ kV}$; $I = 641.5 \text{ A}$

$$\text{Pérdidas} = 3L (0.19) (641.5)^2 = W$$

L (km)	1	5	10	15	20
Perdidas (kW)	324	1172	2345	3518	4691

Teniendo $V_L = 6.6 \text{ kV}$; $I = 291.5 \text{ A}$

$$\text{Pérdidas} = 3L (0.19) (291.5)^2 = W$$

L (km)	1	5	10	15	20
Pérdidas (kW)	48.4	242	484	726	968.6

Teniendo $V_L = 13.2 \text{ kV}$; $I = 145.7 \text{ a}$

$$\text{Pérdidas} = 3L (0.19) (145.7)^2 W$$

L (km)	1	5	10	15	20
Pérdidas (kW)	12.11	60.58	121	181	242

Teniendo $V_L = 23 \text{ kV}$; $I = 83.6 \text{ A}$

$$\text{Pérdidas} = 3L (0.19) (83.6)^2$$

l (km)	1	5	10	15	20
Pérdidas (kW)	3.9	19.9	39.9	59.8	79.6

Teniendo $V_L = 34.5 \text{ kV}$; $I = 55.7$

$$\text{Pérdidas} = 3L (0.19) (55.7)^2 = W$$

l (km)	1	5	10	15	20
Pérdidas (kW)	1.77	8.86	17.7	26.6	35.4

Con los resultados obtenidos formaremos una tabla de pérdidas de potencia real en (kW) correspondiente a cada tensión por distancia y después obtendremos la gráfica III.2.

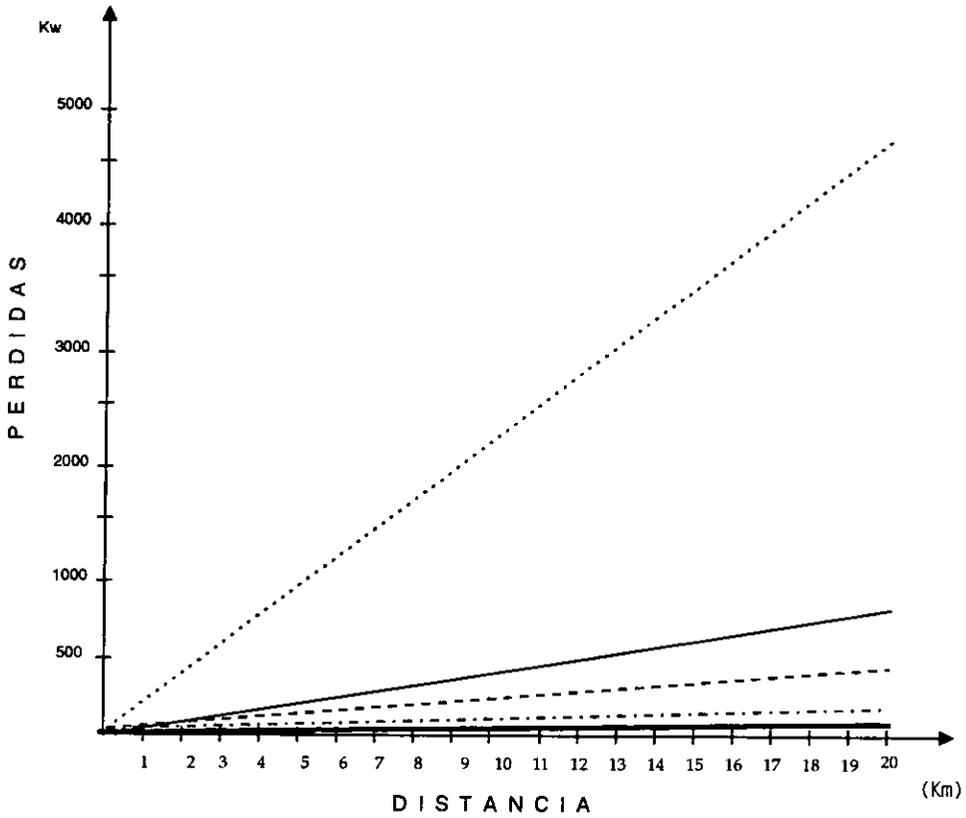
		D I S T A N C I A (K M)				
		1	5	10	15	20
T E N S I O N (K V)	3	234 kW	1172 kW	2345 kW	3518 kW	4691 kW
	6.6	48.4 kW	242 kW	484 kW	726 kW	968.6 kW
	13.2	12.11 kW	60.5 kW	121 kW	181 kW	242 kW
	23	3.9 kW	19.9 kW	39.9 kW	54.8 kW	79.6 kW
	34.5	1.77 kW	8.86 kW	17.7 kW	26.6 kW	35.4 kW

De lo anterior se concluye que con una carga fija de 3 MVA las pérdidas de potencia real son considerables entre mas bajos sean los niveles de tensión. Por consecuencia, los alimentadores primarios a tensiones de 23 y 34.5 kV, tienen menores pérdidas a mayores distancias, lo que significa ahorros importantes para las compañías suministradoras del servicio.

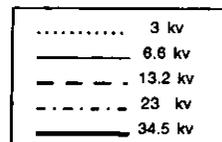
III.3 CONDUCCIÓN

En la construcción de líneas de distribución, los materiales más empleados como conductores son el cobre y el aluminio. La selección depende de la conductividad, peso, resistencia mecánica y costo. El cobre sirve de referencia para la comparación de la conductividad de otros materiales, siendo el aluminio el siguiente conductor eléctrico desde el punto de vista de conductividad y disponibilidad, el aluminio posee una

GRAFICA III.2



PERDIDAS Vs DISTANCIA



conductividad de cerca de 61% y un peso del 30% del cobre recocido junto con una resistencia de ruptura de 43% del cobre duro.

Cuando se trata de distribución urbana, debido a las altas densidades de carga, la capacidad de corriente, la regulación de voltaje y a veces, la resistencia mecánica para prevenir una flecha excesiva, son generalmente los factores primordiales para seleccionar el calibre y tipo de conductor.

El calibre de los conductores está basado en el American Wire Gage (AWG) que también se conoce como sistema de calibres Brown and Sharp (B & S), en dicho sistema el tamaño del calibre disminuye como aumenta la sección transversal del conductor empleándose para designar secciones pequeñas o medianas siendo su límite máximo el No. 0000 ó 4/0 (13.25 mm. de diámetro) para secciones mayores de la anterior las designaciones se hace en Circular Mils.

Las formas más empleadas de conductores en distribución son principalmente: alambres de sección circular macisa y cables de trenzado concéntrico siendo aquellos confinados a pequeños calibres por dureza y dificultad de manejo.

A partir del calibre No. 0, el empleo de conductores en forma de cable es más conveniente. Los conductores para distribución aérea pueden ser desnudos o con forro aislante optándose por estos últimos solamente cuando es necesario llevar las líneas por lugares expuestos a posibles contactos accidentales con forro actualmente se usan de neopreno y polietileno. Debido a la relativa economía el forro de polietileno es el más empleado definiéndose su espesor por la tensión a que operará el cable.

Cuando se efectúa un estudio para el cambio de nivel de tensión en una red de distribución aérea, uno de los rubros sujetos a revisión es la capacidad de conducción de los conductores que se encuentran instalados. El cual depende: de la temperatura límite de operación; la temperatura ambiente; de las facilidades para disipar el calor; de la forma, color y área de la superficie externa; del material del conductor y de la proximidad de otros conductores con corriente. Sin embargo, la capacidad de conducción resulta independiente de la tensión distribución primaria. Así tenemos que la sección de un conductor se elige más bien en conformidad con las exigencias mecánicas y resulta sobredimensionada con respecto a las cargas por atender. Por lo tanto se puede concluir que al efectuar el cambio de nivel de tensión, el conductor puede mantenerse instalado si se encuentra en óptimas condiciones de operación.

III.4 AISLAMIENTOS

La distribución de voltaje a diferentes tensiones implica diversas consideraciones para los aislamientos que se emplean, tales como: la selección de apartarrayos, fusibles y portafusiles, distancia entre conductores, aisladores, etcétera. De su adecuada modificación depende en gran parte el éxito del cambio de voltaje de una red.

Para el presente estudio no avocaremos al análisis de los aisladores empleados en los circuitos primario de distribución.

A los aisladores debemos considerarlos, inmediatamente después de los conductores, como los elementos eléctricos más importantes en la construcción de líneas aéreas, puesto que los conductores, ya sean desnudos o con forro, necesitan un dispositivo aislante que los sostenga en

la posición adecuada y a cierta distancia conveniente de partes estructurales, de otros conductores y de la misma tierra.

Un aislador puede considerarse como un dispositivo eléctrico hecho para satisfacer a la vez las necesidades eléctricas y las necesidades mecánicas, razón por la que su diseño queda sometido a principios mecánicos tanto como a eléctricos, ya que está expuesto a grandes esfuerzos de diverso origen, tales como estiramiento de líneas durante la construcción, contratación y dilatación por cambios de temperatura, efecto de viento y otros de igual o menor importancia. Por otra parte las dimensiones de un aislador están en relación con la tensión límite que puede soportar sin flamear, así como con la corriente que se escapa a lo largo de su superficie.

La selección de aisladores requiere un estudio cuidadoso debido a que en algunas es necesario un sobreaislamiento, por ejemplo, las líneas de distribución instaladas en poblaciones frente o cerca del mar deberán poseer mayor aislamiento que las construidas en poblaciones retiradas de las costas, debido a que las primeras están expuestas a los vientos que soplan del mar llevando un vapor de sal fina, parte de la cual se deposita sobre los aisladores, cuando este vapor aire llega a partes lejanas de las costas, las frecuentes lluvias disuelven la sal depositada y limpian los aisladores, si la lluvia es por temporada existe el peligro de falla.

Los materiales más empleados en la construcción de aisladores son la porcelana el vidrio y la baquelita, en la actualidad la mayoría de aisladores , para usarse en líneas aéreas de energía eléctrica, se fabrican de porcelana y en menor escala de vidrio, siendo en ambos casos de tipo alfiler o de tipo de suspensión.

A los aisladores de tipo alfiler se les da este nombre considerándose la forma de fijarse del aislador, el alfiler propiamente dicho, es de fierro redondo de 5/8", se fija verticalmente hacia arriba de la cruceta y sobre él se monta el aislador en la cuerda cilíndrica de plomo de que va provisto; la fijación del conductor sobre el aislador se efectúa sobre las ranuras expuestas que tiene el aislador, ayudándose de grapas o seguros adecuados.

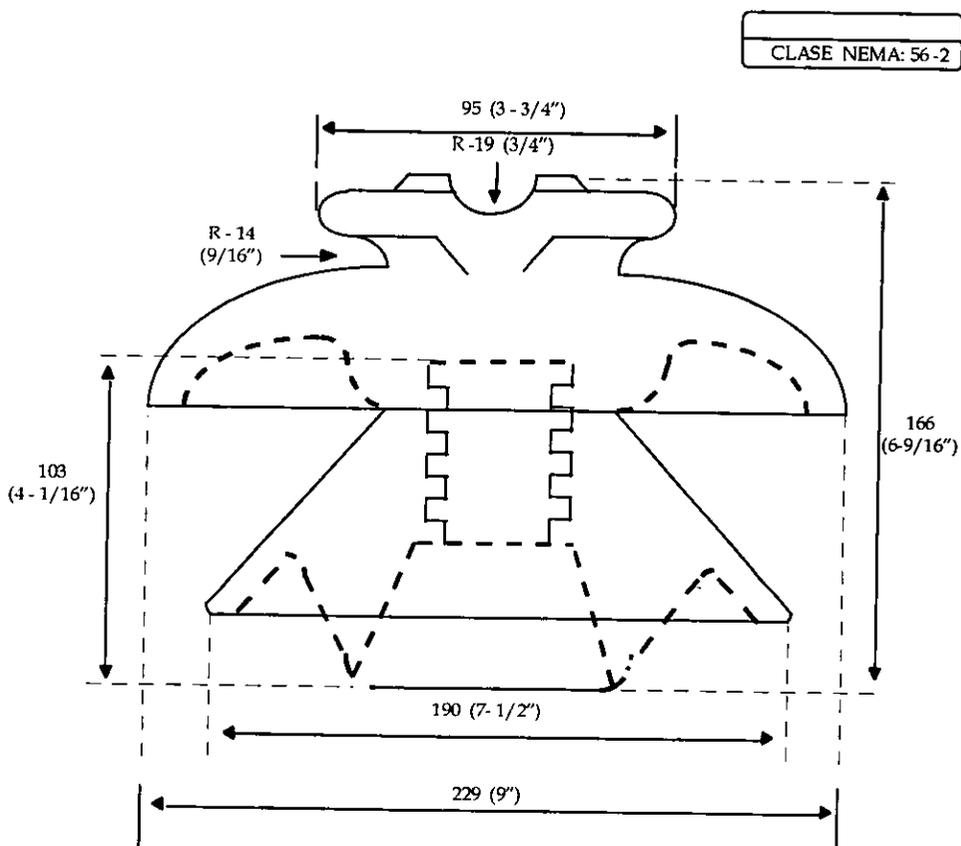
Con respecto a los aisladores de suspensión se forman cadenas con una serie de campanas o faldas iguales entre si, tantas como sea necesario y según el voltaje de trabajo.

La figura 3.1 muestra la norma de los aisladores para 23 y 34.5 kV, en donde se proporcionan sus características mecánicas y físicas.

Para poder seleccionar los aisladores en una determinada aplicación, es necesario conocer su comportamiento al aplicarles los tres tipos de sobrevoltajes que pueden presentarse en un sistema eléctrico de potencias: sobre voltajes de baja frecuencia, impulsos eléctricos debidos a rayos y sobrevoltajes de alta frecuencia debidos a la operación de interruptores.

Para establecer la función principal de un apartarrayos, que es prevenir una tensión excesiva en los equipos protegidos, se requiere coordinar las características de aislamiento del equipo con las de protección del apartarrayos. La característica de aislamiento es la curva tensión-tiempo, conocida como el nivel impulso, que representa la tensión resistente del equipo. La característica de flameo de los apartarrayos es también una curva tensión-tiempo que indica la tensión y el tiempo a los cuales flamea el apartarrayos y comienza a pasar la corriente transitoria a tierra. La característica de aislamiento del equipo debe estar siempre a un nivel de tensión más alto que la característica del apartarrayos, y debe

AISLADOR DE PORCELANA TIPO ALFILER



ACOTACIONES EN mm.
Y PULGADAS

FIGURA 3.1 - A

ESTA TESIS NO DEBE
CALIR DE LA BIBLIOTECA

DATOS TECNICOS			SISTEMA			
			METRICO		INGLES	
			VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD
CARACTERISTICAS ELECTRICAS						
TENSION NOMINAL			23	KV.	23	KV.
TENSION DE FLAMEO	A 60 HZ	EN SECO	110	KV.	110	KV.
		EN HUMEDO	70	KV.	70	KV.
	AL IMPULSO ONDA 1.2 x 50 µS.	POSITIVO	175	KV.	175	KV.
		NEGATIVO	225	KV.	225	KV.
TENSION DE PERFORACION			145	KV.	145	KV.
RADIO INTERFERENCIA	TENSION DE PRUEBA A 60 HZ		22	KV.	22	KV.
	TENSION A 1000 KHZ		100	µV.	100	µV.
DISTANCIAS	DE FUGA		432	mm.	17	Pulg.
	DE FLAMEO EN SECO		210	mm.	8 - 1/4	Pulg.
PROPIEDADES MECANICAS Y FISICAS						
RESISTENCIA MECANICA CANTILEVER			1361	Kg.	3000	Lbs.
DIMENSIONES DEL ALFILER	DIAMETRO DEL DEDAL DE PLOMO		3.49	cm.	1 - 3/8	Pulg.
	ALTURA RECOMENDABLE		20.4	cm.	8	Pulg.
PESO	NETO POR PIEZA		5.25	Kg.	11.6	Lbs.
	EMBARQUE DOMESTICO/CAJA CARTON		18	Kg.	40	Lbs.
	EMBARQUE EXPORTACION/CAJADE MADERA		30	Kg.	66	Lbs.
EMPAQUE NORMAL EN CAJA DE CARTON			3	Pz.	3	Pz.
VOLUMEN DE 100 PZ. DE EXPORTACION			0.05	m ³	1.7	Pies ³

REFERENCIAS					
NORMAS NACIONALES		NORMAS EXTRANJERAS	CODIFICACION		
NORMA OFICIAL MEXICANA	NOM - J - 246	ANSI C.29	C. F. E	DESCRIPCION	CLAVE
				13A	5255371212

AISLADOR DE PORCELANA TIPO ALFILER

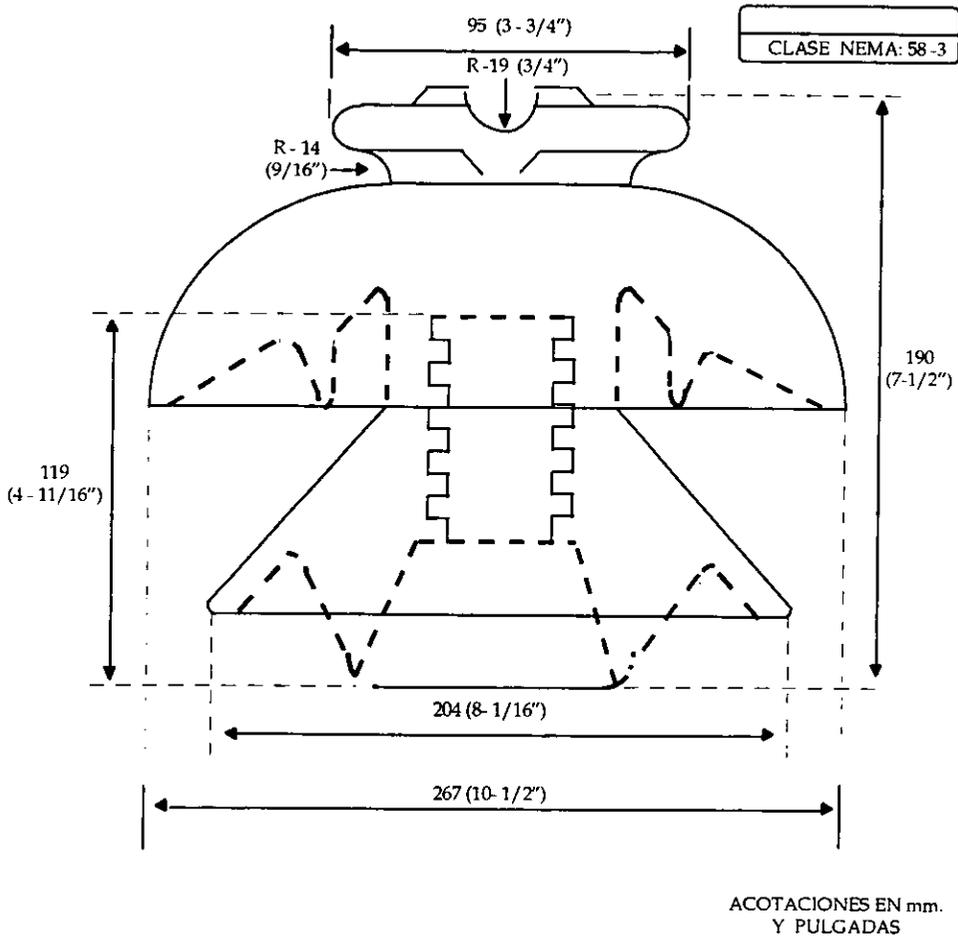


FIGURA 3.1 -B

DATOS TECNICOS			SISTEMA			
			METRICO		INGLES	
			VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD
CARACTERISTICAS ELECTRICAS						
TENSION NOMINAL			34.5	KV.	34.5	KV.
TENSION DE FLAMEO	A 60 HZ	EN SECO	125	KV.	125	KV.
		EN HUMEDO	80	KV.	80	KV.
	AL IMPULSO ONDA 1.2 x 50 µS.	POSITIVO	200	KV.	200	KV.
		NEGATIVO	265	KV.	265	KV.
TENSION DE PERFORACION			165	KV.	165	KV.
RADIO INTERFERENCIA	TENSION DE PRUEBA A 60 HZ		30	KV.	30	KV.
	TENSION A 1000 KHZ		200	µV.	200	µV.
DISTANCIAS	DE FUGA		534	mm.	21	Pulg.
	DE FLAMEO EN SECO		242	mm.	9 - 1/2	Pulg.
PROPIEDADES MECANICAS Y FISICAS						
RESISTENCIA MECANICA CANTILEVER			1361	Kg.	3000	Lbs.
DIMENSIONES DEL ALFILER	DIAMETRO DEL DEDAL DE PLOMO		3.49	cm.	1 - 3/8	Pulg.
	ALTURA RECOMENDABLE		22.8	cm.	9	Pulg.
PESO	NETO POR PIEZA		7.3	Kg.	16	Lbs.
	EMBARQUE DOMESTICO/CAJA CARTON		2.5	Kg.	55	Lbs.
	EMBARQUE EXPORTACION/CAJADE MADERA		44	Kg.	97	Lbs.
EMPAQUE NORMAL EN CAJA DE CARTON			3	Pz.	3	Pz.
VOLUMEN DE 100 PZ. DE EXPORTACION			0.06	m ³	2	Pies ³

REFERENCIAS					
NORMAS NACIONALES		NORMAS EXTRANJERAS		CODIFICACION	
NORMA OFICIAL MEXICANA	NOM - J - 246	ANSI - C.29.6	C. F. E	DESCRIPCION	CLAVE
				33A	526T3D3412

existir una diferencia de tensión suficiente entre las dos curvas. La figura 3.2 muestra estas características.

El nivel de impulso puede ser suficientemente alto para que el apartarrayos de una protección adecuada; y lo suficientemente bajo para que los costos de aislamiento sean económicos prácticamente.

El aislamiento del equipo eléctrico en cualquier sistema esta sujeto a sobretensiones debidas a regulación, fallas en el sistema, operación de interruptores o descargas atmosféricas. Las sobretensiones producidas por los primeros tres factores generalmente no afectan el aislamiento del sistema pero pueden, en algunos casos dañar los dispositivos de protección. La razón principal de la protección contra sobretensiones es por descargas atmosféricas.

III.4.1 NIVEL DE AISLAMIENTO AL IMPULSO

El comportamiento de un aislador sometido a impulsos de voltaje similares a los producidos por rayos depende principalmente de su longitud y en grado menor de la geometría del aislador. Por lo tanto, el valor al que se flamea un aislador al que se le aplican impulsos de voltaje depende tanto de la longitud como del tiempo que estén aplicados.

Si se somete un aislador a una serie de impulsos de voltaje de forma de onda normalizada de 1.2×40 microsegundos y de diversos valores de cresta y se traza la gráfica determinada por el valor de cresta de cada onda y el tiempo que tarda en producirse el flameo del aislador, se obtiene la curva de la figura 3.3 que se llama curva voltaje-tiempo del aislador, cuya terminología se escribe a continuación:

COORDINACION ENTRE LA CARACTERISTICA DE OPERACION
DE UN PARARRAYOS Y LA CURVA VOLTAJE-TIEMPO
DE UN AISLADOR

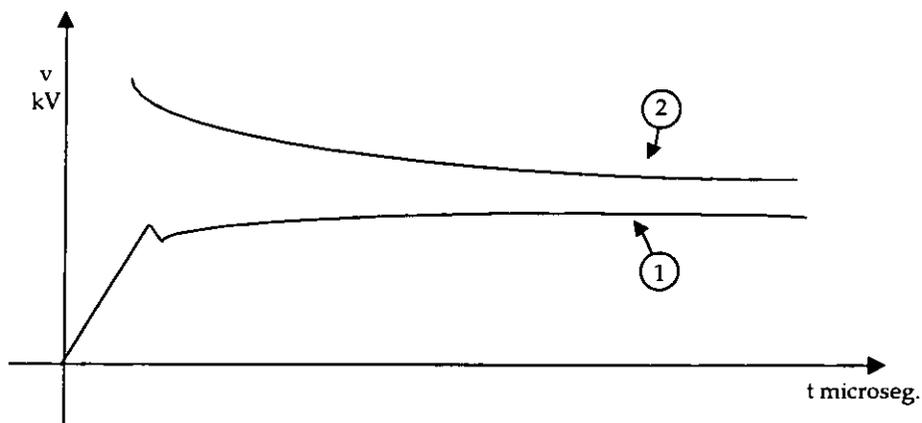


FIGURA 3.2

- 1: Flameo de frente de onda.- Flameo en la parte ascendente de la onda antes de llegar al valor de cresta.
 - 2: Flameo de Cresta.- Flameo en la cresta de la onda.
 - 3: Flameo de cola.- Flameo en la parte descendente de la onda después de la cresta.
- Vc: Tensión de cresta de la onda que causa el flameo del aislador en el 50% de las aplicaciones.
- Vi: Es el valor de cresta de la onda de mayor magnitud que soporta el aislador sin flamearse.

El voltaje de flameo de los aisladores en aire varía en proporción directa del factor de densidad del aire, que está dado por la siguiente expresión:

$$\int = \frac{3.92 b}{273 + T}$$

\int = factor de densidad de aire.

b = presión barométrica en cm. de columna de mercurio.

T = temperatura ambiente en °C.

Concretando, se puede afirmar que al aumentar la altitud sobre el nivel del mar, lo que implica una disminución de la presión atmosférica, disminuye el nivel de aislamiento de los aisladores en aire y es necesario aumentar el aire y es necesario aumentar el aislamiento externo de las instalaciones.

III.4.2. COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO

La coordinación de aislamiento es el conjunto de las disposiciones tomadas para que los materiales eléctrica de una misma instalación tengan un margen de seguridad apropiada respecto de las sobretensiones y que las descargas de arco puedan ser ubicadas en puntos donde no originen daños.

En la práctica se base en la correlación necesaria entre la rigidez dialéctica del equipo eléctrico, las sobretensiones supuestas y las características de los dispositivos de protección.

En suma la coordinación de aislamiento consiste en combinar las características de operación de los apartarrayos con las curvas voltaje-tiempo de los aislamientos, para poder ofrecer una protección efectiva y económica contra sobrevoltajes transitorios.

De la figura 3.2 , la curva 1 representa la característica de operación de un apartarrayos que define el nivel de protección; la curva 2 es la curva voltaje-tiempo de un aislamiento. Para tener una protección efectiva la curva 2 debe quedar siempre sobre la curva 1.

III.4.3. NIVELES DE AISLAMIENTO AL IMPULSO NORMALIZADOS

En 1941, un comité conjunto AIEE-EEL-NEMA se propuso normalizar el aislamiento de los aparatos eléctricos para lo que se fijo un nivel básico de aislamiento al impulso correspondiente a cada clase de voltaje, como se ilustra a continuación.

1	2	3
CLASE DE AISLAMIENTO	NIVEL BÁSICO DE AISLAMIENTO AL IMPULSO COMPLETO	NIVEL BÁSICO DE AISLAMIENTO AL IMPULSO REDUCIDO
5	75	
8.7	95	
15	110	
23	150	
34.5	200	
46	250	
69	350	
92	450	
115	550	450
138	650	550
161	750	650
230	1 050	900
287		1 050
345		1 300
440		1425
500		1 550

Los niveles de aislamiento al impulso referido en la columna 2 se fijaron inicialmente independientemente de la forma en que estuviesen conectados los neutros de los sistemas. Estos niveles de aislamiento quedan coordinados para usar apartarrayos 100%, de otra forma dicho, de un voltaje nominal igual al máximo voltaje entre hilos en operación.

CAPITULO IV

CONSIDERACIONES PARA INCREMENTAR LA TENSIÓN EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Aparentemente los aumentos en las cargas de un sistema de distribución son definitivos para pensar en elevar el nivel de voltaje, pero cambiar la tensión en todo un sistema es una cuestión compleja y en su planeación y decisión es conveniente establecer amplios criterios relacionados con el crecimiento histórico de cada una de las áreas involucradas en el sistema.

Asimismo, en largos alimentadores radiales que abastecen servicios rurales moderadamente cargados separados por grandes distancias, la más económica respuesta de esta zona específica puede ser la elevación del nivel del voltaje, resultando desde luego más barato que reforzar con mayores calibres de conductores las troncales y las derivaciones a los servicios con mayor carga.

Resulta conveniente para una mejor exposición de este trabajo dividir en dos partes las consideraciones técnicas para el incremento de voltaje refiriéndonos a la distribución urbana y la distribución rural, y por último se citan la evolución, los beneficios y problemas de la distribución primaria de 34.5 kV, que hasta la fecha es la más alta tensión en sistemas de distribución, en el país.

IV.1. EN ÁREAS URBANAS CON ALTA DENSIDAD DE CARGA

En el medio urbano las redes de distribución de gran capacidad y complejidad presentan zonas con diversos tipos de carga o estrictamente residenciales, comerciales, industriales, zonas en las que el incremento en la carga ocurre debido al aumento en el uso de la energía eléctrica por nuevos aparatos, máquinas o equipos de los consumidores, además de usuarios de todos tipos que solicitan diversas cargas que agotan las capacidades de los alimentadores en menor tiempo de la planeación hecha. Lo cual se ha confirmado en los desarrollos urbanos que surgen en las zonas periféricas a las grandes ciudades, resultado que estas áreas con bajas densidades de carga inicial dentro de los próximos diez años podrán tener densidades de carga equivalente a las más altas.

Desde luego que aumentos notables en la demanda, darán origen a nuevos alimentadores y a nuevas subestaciones, pero existen límites técnicos, económicos y físicos en los que no funcionará ésta solución. Esto significa, inevitablemente que el nivel de voltaje del sistema de distribución debe elevarse, tomando en cuenta los indicadores técnicos, económicos y físicos que a continuación se describen.

TRAYECTORIAS SATURADAS.- Al planear una nueva subestación las trayectorias de sus nuevos alimentadores son fáciles de determinar. Al pasar el tiempo, los aumentos en la demanda agotan la capacidad de la subestación con la salida de más alimentadores, llegando gradualmente a congestionar las calles o avenidas con las troncales, ya sean aéreas o subterráneas, en uno o en otro caso se deben llenar ciertos requisitos técnicos.

En el caso de líneas es recomendable utilizar por aspecto solamente una acerca de la calle soportando una troncal por corrida de postes para evitar dificultades de libramientos, construcciones especiales, dudas o

errores al consultar planos o diagramas, contaminación en los disturbios, pero sobre todo posibles confusiones que afectan la seguridad del personal de campo.

Por lo que se refiere a una nueva troncal con cables subterráneos son extremas las dificultades, puesto que la instalación del banco de ductos resulta costosa si es una adición a los existentes en los que ya fueron planeados y construidos los posos de visita para el banco de ductos que incluía los aumentos de cables alimentadores a determinado plazo y por tanto están agotados los ductos de reserva.

Así llegamos a la conclusión que las trayectorias están saturadas y la conversión a un mayor voltaje debe ser lo indicado.

UTILIZACIÓN OPTIMA DE SUBESTACIONES.- En un sistema de distribución con aumento de carga constante, después de identificar las alternativas factibles de incrementar la capacidad en subestaciones existentes o la instalación de nuevas subestaciones, con frecuencia sucede que cuando se requieren nuevas rutas para alimentadores o lugar para nuevas subestaciones dentro del área de servicio resulta difícil lograrlo. Entonces, cuando los terrenos o predios adecuados para nuevas subestaciones son escasos y costosos para obtenerlos, pocas, pero mayor capacidad de las subestaciones puede ser la respuesta, esto inevitablemente significa un mayor nivel al voltaje de distribución. También si la carga aumentó en exceso de pronósticos el cambio a mayor tensión reduce trabajos para proporcionar nuevos servicios y puede resultar económico convertir áreas ligeramente cargadas que muestran tendencia a aumentar su densidad de carga superiores al promedio.

Esto requiere una inversión relativamente baja en las primeras etapas de crecimiento, en cambio los costos de cambio de voltaje se incrementan cuando aumenta la densidad de carga. A este indicador lo podemos

considerar como aumento alto de densidad de carga, por lo que será de utilidad conocer las curvas de densidad de carga para delimitar las zonas en estudio.

Desde luego, al tratar los casos de alimentadores sobrecargados, áreas con alta densidad de carga y subestaciones de distribución en su límite de operación; las limitaciones térmicas se afectan en todos los casos, así como la calidad del servicio, es decir, la regulación del voltaje deja de ser aceptable, no pudiéndose sostener dentro de los límites existentes, entonces es necesario un nuevo y mayor nivel de voltaje.

Los indicadores mencionados pueden convertirse en criterio para el propósito de justificar un cambio a mayor nivel de voltaje. Establecerlo definitivo y aplicable a todos los sistemas es imposible debido a las infinitas variaciones de las utilidades de la energía eléctrica. Para lo cual es necesario revisar las experiencias de los sistemas que han modificado su nivel de voltaje, a fin de desarrollar una lista general de indicadores de aplicación universal.

IV.2 EN ÁREAS DE DISTRIBUCIÓN RURAL

Una de las finalidades que persigue cumplir el sector eléctrico de nuestro país, es proporcionar la energía eléctrica a cuanta población exista. Este es un reto que ha planteado un serio problema técnico, ya que muchas poblaciones se encuentran sumamente alejadas unas de otras en lugares inhóspitos que complican cualquier tipo de abastecimiento.

Así tenemos que la más económica respuesta para poder alimentar cargas pequeñas o medianas, manteniendo una regulación de voltaje aceptable a grandes distancias, es el establecimiento de una tensión de distribución alta, pudiendo ser la de subtransmisión, cuando existe.

Diferentes son las soluciones para proporcionar estos servicios como la distribución trifásica convencional desde el punto de alimentación, que generalmente es una subestación; la distribución monofásica fase-neutro, desde una línea troncal trifásica 3 Ø, 4 H; y la distribución basada en el método SWER (Single Wire Earth Return) que consiste en un solo conductor de fase con retorno por tierra.

El último método se encuentra desarrollado por su importante ahorro en el costo de la línea comparado con la distribución trifásica. Su uso se ha visto fortaleciendo por el empleo del convertidor estático de fase que posibilita utilizar máquinas trifásicas para aplicaciones importantes para estas comunidades como el bombeo de pozos artesanos, irrigación aérea, industria casera, etc.

En México la distribución de energía eléctrica en una área rural para pequeñas poblaciones que se encuentran diseminadas en forma por demás irregular y con distancias considerables entre si, con frecuencia pecan de duplicidad de líneas a diferentes voltajes, el de subtransmisión, esta duplicidad resulta costosa y que logran economías substanciales eliminando uno de los circuitos así como las subestaciones reductoras de tipo rural que aparte de los transformadores tiene instalado equipo costoso como: cuchillas, portafusibles, interruptores, seccionadores, apartarrayos, etc. Es evidente que el circuito a eliminar será el de menor tensión resultando que la distribución experimentará un conversión a mayor nivel de voltaje.

Dado que la tensión de subtransmisión es 34.5 kV, ésta se viene extendiendo definitivamente como tensión primaria de distribución rural.

La experiencia en construcción y operación a un mayor voltaje es deseable antes de iniciar su cambio a gran escala en zonas de alta densidad de carga en donde la complejidad del funcionamiento del sistema de

distribución llega al máximo. Por lo tanto la conversión de sistemas sencillos ayudan a ganar experiencias que se utilizan en el desarrollo de estudios, proyectos, programas de trabajo y maniobras de campo adecuadas, proveyendo incalculable entrenamiento que prepara al personal de gabinete y campo para los cambios de voltaje en áreas congestionadas.

En otras palabras al decidir elevar el nivel de voltaje de un sistema de distribución resulta conveniente iniciarlo en las partes que abastecen zonas rurales.

IV.3. EVOLUCIÓN BENEFICIOS Y PROBLEMAS DE LA DISTRIBUCIÓN PRIMARIAS A 34.5 kV.

Las tensiones primarias nominales que se usan, son el resultado de estudios efectuados por las sociedades de ingenieros electricistas que consideran conveniente, como de hecho lo es una tabulación de voltajes preferidos y recomendables para cada parte de los sistemas eléctricos llevando como fin al mismo tiempo normalizar la manufactura de todo el equipo eléctrico con la consiguiente economía.

Las tensiones de distribución a partir de 1950 empezaron a elevarse, con anterioridad los voltajes inferiores a 7.2 kV habían sido desechados. Las tendencias de aumento de carga originaron problemas que detectaron que voltajes de distribución más altos sería necesarios en un futuro cercano y resultó cierto, los niveles de voltaje existentes ya eran obsoletos en varios lugares.

Se construyeron sistemas de 13.2 kV con transformadores en conexión delta y 13.2/7.6 kV en conexión estrella. Debido a que en varios sistemas se utilizaba para la subtransmisión 34.5 kV, se estudió su utilización como voltaje de distribución señalando las ventajas siguientes: provee mejor

regulación de voltaje y reduce problemas de oscilaciones. Este voltaje puede alimentar cargas mayores, algunas de ellas de otra forma requerirían ser abastecidas por las tensiones de transmisión.

La distribución a 34.5 kV elimina una transformación y un nivel de voltaje; así mismo, reduce el número de subestaciones primarias de distribución.

Las primeras incursiones en la distribución a 34.5 kV se dieron en el noroeste de los estados Unidos a principios de la década de los años cincuenta, careciendo aún de equipos apropiados, puesto que los transformadores, apartarrayos y portafusibles para entonces, eran del tipo de subestación con nivel básico de impulso de 200 kV. Cinco años después el costo de los transformadores de 34.5 kV había experimentado un apreciable descenso al salir al mercado un transformador de distribución con nivel básico de impulso de 150 kV acompañado de pararrayos y de cortacircuitos diseñados para 27 kV.

La Virginia Electric and Power Co., puso en servicio a mediados de 1963 la primera instalación con nivel de aislamiento reducido, utilizando en ella aisladores de alfiler con 384 mm de distancia de fuga, cadenas de tres aisladores de suspensión de 152.4 mm de diámetro en los remates y transformadores de distribución con nivel básico de impulso de 125 kV, protegidos por apartarrayos y portafusibles de 27 kV.

Al principio de la década de los años setenta los Ingenieros Smith, Aner y Nikel comentaron los resultados observados en los sistemas de distribución a 34.5 kV, destacando sus bondades al igual que sus defectos y presentaron recomendaciones generales para su correcta aplicación que fueron de gran valor para los próximos a utilizar este nivel de voltaje:

RESUMEN DE BENEFICIOS Y PROBLEMAS.- Los resultados del estudio presentado sugieren la economía de voltajes primarios en 34.5 kV, esto así como otros beneficios y problemas relacionados a la implementación del nivel de voltaje de distribución se resumen:

- * La conversión a un mayor voltaje aumenta la capacidad del sistema haciendo mejor uso de los predios de las subestaciones, de las instalaciones aéreas en las calles y avenidas y aprovechando mejor los bancos de ductos en las áreas urbanas.
- * En zonas de baja densidad de carga el uso de un mayor voltaje reduce las pérdidas suficientemente para ahorrar costos.
- * Los problemas asociados con un mayor voltaje en la distribución incluye al inicio baja demanda de los componentes, seguridad, confiabilidad y detección de fallas.
- * En la actualidad la demanda y la producción de equipo y accesorios para 34.5 kV es relativamente baja; por lo tanto, sus costos son altos comparados con los componentes de mayor uso.
- * Varios componentes contribuyen a los altos costos de la distribución primaria a mayor voltaje; entre otros, los transformadores de distribución, pararrayos, cable subterráneo, interruptores para operación con carga, cuchillas desconectadas, capacitores, etc.; sin embargo, como aumente los sistemas a 34.5 la producción de estos componentes aumentará y sus costos disminuirán.

Utilizando las experiencias de las Compañías Americanas en la distribución a 34.5/20 kV, a 3 fases, 4 hilos, multiaterrizada, en México al Comisión Federal de Electricidad en su división Golfo-Norte en el año de 1966 y el Instituto Costarricense de Electricidad en 1975, ponen en

servicio las primeras instalaciones de distribución de energía eléctrica a 34.5/20 kV.

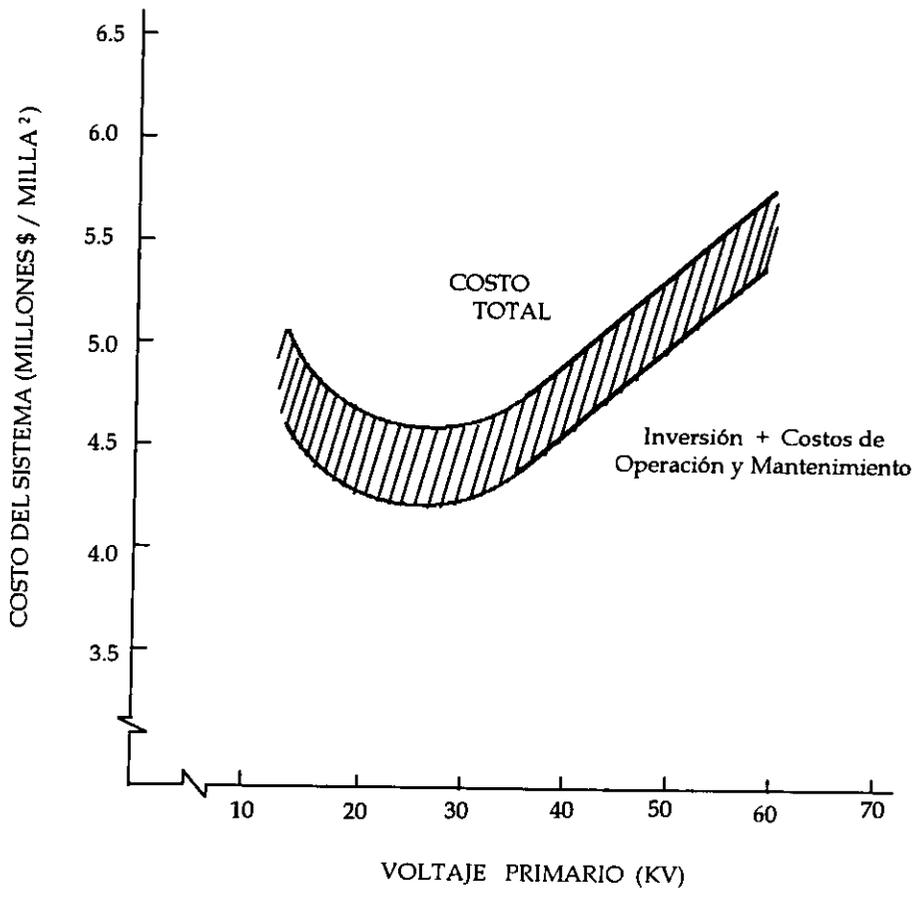
Un estudio realizado por ingenieros de la Philadelphia Electric Co., llevó a la revisión un modelo desarrollado para el costo de un sistema de distribución y utilización, facilitando específicamente la óptima elección de los voltajes de distribución y utilización, incluyendo la fabricación y comercio en la selección de los componentes individuales (transformadores, interruptores, conductores, etc.) y su disposición dentro del sistema en el que se encuentra la demanda de energía, satisfaciendo con seguridad la regulación de voltaje y otros apremios.

El modelo evalúa inversiones de capital, operación, mantenimiento y costo de pérdida de energía anual sobre un período planteado y tiene la capacidad para simular:

- * construcciones aéreas, subterráneas o mixtas.
- * El uso de voltajes primarios de 13 kV a 69 kV y en el voltaje de utilización de 120 a 960 volts monofásico o trifásico.
- * Desarrollo anual de la carga dentro de un área en servicio.

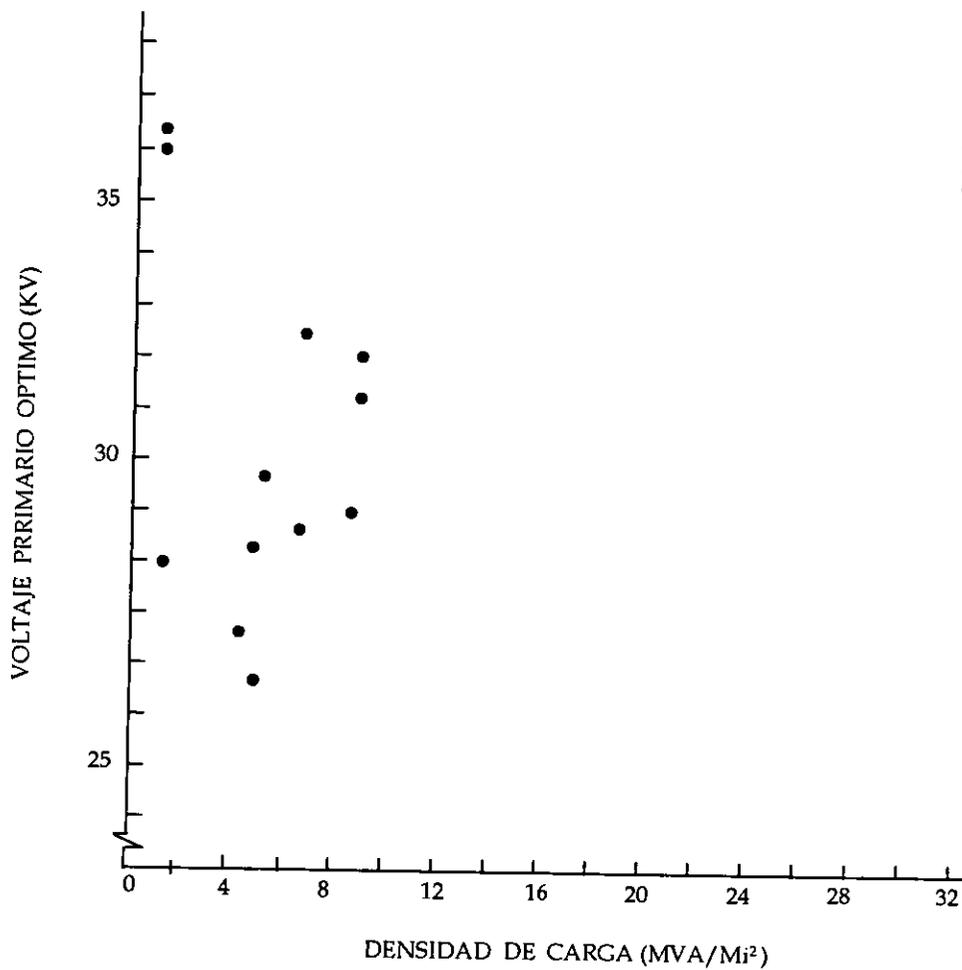
El modelo también considera cambios en los costos de energía en el período estudiado.

Los resultados de la computadora, utilizando el modelo son presentados en las figuras 4.1 y 4.2 y la interpretación demuestra los beneficios de los voltajes de distribución de 22 a 38 kV. Considerando dos empleos del modelo mencionado y sumando los resultados obtuvieron las gráficas los ingenieros Hazelrrig, Kim y Adler; concluyendo que los niveles de voltajes de distribución más económicos oscilan entre 22 y 38 kV y que los niveles de voltaje mayores de 38 kV no son competitivos.



COSTOS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN EN FUNCIÓN VOLTAJE PRIMARIO

FIGURA 4.1



MUESTREO DE LA RELACIÓN ENTRE EL VOLTAJE PRIMARIO Y LA DENSIDAD DE CARGA DEL ÁREA SERVIDA.

FIGURA 4.2

CONCLUSIONES

En la exposición del presente trabajo hemos hecho referencia a un modelo idealizado que pretende mediante un estudio general determinar los conceptos de la máxima área de carga cubierta y del mínimo porcentaje de caída de voltaje de un alimentador primario en una red de distribución aérea. Entendemos que dicho estudio no es forzosamente aplicable a problemas específicos; sin embargo, aporta una valiosa herramienta para conocer las relaciones fundamentales entre los parámetros antes citados, la densidad de carga, el nivel de voltaje de la red y sus efectos en el tamaño y forma del área servida por el alimentador; también nos permite definir las relaciones entre el voltaje del sistema y las pérdidas I^2R del conductor en el alimentador primario, dándonos índices que proporcionen sugerencias para optimizar una red de distribución aérea.

Así mismo, basándonos en los cálculos y gráficas obtenidas, y en las consideraciones técnicas tomadas, se sugiere la utilización de un nivel mayor de voltaje en los sistemas de distribución tanto para las áreas rurales como para las áreas urbanas.

De mantenerse los voltajes de distribución primaria de bajo rango, serían indispensables mayor número de subestaciones ubicadas en los centros de las ciudades en los que la obtención de los predios escasea y además de costosos en exceso resultan en extremo conflictivos desde su alimentación de las líneas de transmisión hasta cada una de las salidas de los circuitos de distribución, pasando por sus servicios auxiliares, mantenimiento y operación.

Las técnicas actuales de fabricación de equipo eléctrico, hacen posible que los sistemas de distribución rural se puedan realizar con los materiales y equipos de las zonas urbanas, reduciendo así el catálogo de

normas de materiales, en muchos casos, transformaciones, duplicidad de circuitos primarios, pérdida en grandes distancias; en contraste con lo urbano, la densidad de carga por unidad de superficie es pequeña, los consumidores domésticos demandan una cantidad de carga reducida y las cargas de fuerza son escasas; sin embargo, la situación está cambiando con la desconcentración planeada de los grandes núcleos de población, las industrias emigran con mayor fluidez a corredores o fraccionamientos industriales en pequeñas poblaciones y en muchos casos éstas se instalan espaciadas a lo largo de las carreteras, por lo que los proyectos de distribución rural deben anticiparse a esta situación.

Por lo anterior, una mejora en los circuitos primarios de distribución es elevar el nivel de voltaje, con lo que se logra alimentar grandes bloques de carga, se aumenta la distribución de suministro con buena regulación de voltaje y se reducen las pérdidas, evitando así la problemática que con anterioridad fue esbozada.

Históricamente, el proceso ya se ha efectuado en varios sistemas, solo que no se había llegado a los límites de voltaje óptimo.

BIBLIOGRAFÍA

- Burgos Monfort José,
"ELECTRICIDAD INDUSTRIAL"
BOSSAT SA 1978.
- Compañía de Luz y Fuerza del Centro,
"NORMAS DE MONTAJE DE LÍNEAS AÉREAS".
- Fuentevilla F Gustavo,
"USO DEL SISTEMA 19.9/34.5 Kv EN REDES DE DISTRIBUCIÓN
RURAL CON BAJA DENSIDAD DE CARGA Y COSTO COMPARATIVO
AL USAR TENSIONES MAS BAJAS DE DISTRIBUCIÓN",
C F E 1974.
- Gruchala E.E.
"34.5 Kv DISTRIBUTION OVERHEAD AND UNDERGROUND",
7th IEEE 1979.
- Robles Harman,
"DISTRIBUCIÓN A 34.5 Kv"
ICE COSTA RICA 1985.
- Westinghouse,
"ELECTRICAL TRANSMISSION AND DISTRIBUTION"
REFERENCE BOOK.
- S.H. Davis ,
"34.5 Kv DISTRIBUTION"
7th IEEE 1979.

- Shults N.R.,
"DISTRIBUTION PRIMARY FEEDER I² R LOSSES"
IEEE Vol. 2 1978.

- Smith B.E
"34.5 KV DISTRIBUTION AT THE VIRGINIA ELECTRIC AND POWER
COMANY"
IEEE 1970

- Swetman Neale,
"WHEN SHOULD YOU BOST YOUR DISTRIBUTION VOLTAJE LEVEL"
PUBLIC SERVISE ELECTRIC AND GAS CO
ELECTRICAL WORLO 1970.

- Valero Garces Roberto,
"PROTECCIÓN CONTRA SOBRE CORRIENTES EN LOS SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN"
COMPAÑÍA DE LUZ Y FUERZA DEL CENTRO.

- Van Wormer F.C.,
"SOME ASPECTS OF DISTRIBUTION LOAD AREA GEOMETRY"
AIEE 1954.

- Viqueira Landa Jacinto,
"REDES ELECTRICAS" Vol. I
ALFAOMEGA 1993