



19
20j-

Universidad Nacional Autónoma
de México



Facultad de Estudios Superiores
CUAUTITLAN

“Fenómenos Generales en las Líneas de Transmisión Aereas”

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A
HERRERA PONCE LUIS

Asesor: ING. ALFONSO RODRIGUEZ CONTRERAS



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

CAPITULO 1. INTRODUCCION:

1.1 Fundamentos de Electricidad.....	1
1.2 Sistemas de Corriente Alterna.....	5
1.3 Descripción de los Sistemas Eléctricos de Potencia.....	7
1.4 Componentes de las Líneas de Transmisión Aéreas.....	12
1.5 Tipos normalizados de torres de transmisión.....	22
1.6 Clasificación de las Líneas de transmisión.....	27

CAPITULO 2. EFECTO CORONA:

2.1 Descripción del Efecto Corona.....	30
2.2 Condiciones de aparición del Efecto Corona.....	31
2.3 Radio-Interferencia.....	38
2.4 Voltaje Crítico Disruptivo.....	40
2.5 Pérdidas por Efecto Corona.....	45
2.6 Factores que afectan al Fenómeno Corona.....	49

CAPITULO 3. SOBRETENSIONES EN LINEAS DE TRANSMISION:

3.1 Teoría de las descargas atmosféricas.....	53
3.2 Efectos de las descargas atmosféricas.....	59
3.3 Sobrevoltajes de tipo externo.....	61
3.4 Sobrevoltajes de origen interno.....	64
3.5 Protección contra sobrevoltajes.....	67
3.6 Sobrecorrientes en las Líneas de Transmisión Aéreas.....	81
3.7 Protección contra sobrecorrientes.....	82
3.8 Cortocircuitos en las Líneas de Transmisión.....	84
3.9 Protección contra cortocircuitos.....	89

CAPITULO 4. AISLADORES Y PUESTA A TIERRA DE LAS TORRES:

4.1 Aislantes sólidos cerámicos.....	95
4.2 Pérdidas en aislantes sólidos.....	97
4.3 Aisladores.....	100
4.4 Selección del número de aisladores.....	105
4.5 Efectos de la contaminación en los aisladores.....	115
4.6 Puesta a tierra de las torres.....	118
4.7 Tomas de tierra.....	120
4.8 Mejoramiento de las tierras.....	122
4.9 Resistencia de conexión a tierra de las torres.....	124

CAPITULO 5. ASPECTOS MECANICOS:

5.1 Soportes para Lineas de Transmisi3n.....	127
5.2 Flechas y tensiones mec3nicas en los conductores.....	132
5.3 Variaci3n de la Reactancia Capacitiva respecto a la altura de los conductores.....	147
5.4 Aumento de la carga del cable por hielo y viento.....	149
5.5 Ejemplo de c3lculo.....	152
5.6 Variaci3n de la flecha y la tensi3n por temperatura.....	156
5.7 Esfuerzos en los soportes.....	158
5.8 Procedimiento de construcci3n.....	160
5.9 Caracteristicas del proyecto.....	165
CONCLUSIONES.....	168
BIBLIOGRAFIA.....	170

CAPITULO I.
INTRODUCCION.

CAPITULO 1. INTRODUCCION

1.1 FUNDAMENTOS DE ELECTRICIDAD.

ORIGENES:

La palabra electricidad proviene del antiguo vocablo griego para el ámbar -elektrón-. Los antiguos griegos observaron que cuando el ámbar (resina petrificada), se frotaba con una tela, atraía pedacitos de material tal como hojas secas. Los científicos demostraron posteriormente que esta propiedad de atracción ocurría en otros materiales, tales como el hule y el vidrio, pero no sucedía con materiales como el cobre & el hierro. Los materiales que tenían esta propiedad de atracción al frotarse con una tela, se decía que estaban cargados con una fuerza eléctrica; además se observó que algunos de estos materiales cargados eran atraídos por una pieza de vidrio cargada y que otros eran repelidos. Actualmente sabemos que lo que se observaba en realidad era un exceso & deficiencia de partículas llamadas electrones.

TEORIA ELECTRONICA:

Todos los efectos de la electricidad se producen debido a la existencia de una diminuta partícula cargada negativamente, llamada electrón y que gira en órbitas alrededor del núcleo. Todos los átomos se encuentran unidos entre sí por fuerzas poderosas de atracción entre el núcleo y sus electrones. Sin embargo, los electrones de las órbitas exteriores de un átomo, son atraídos hacia su núcleo más débilmente que los electrones cuyas órbitas estén más cerca del núcleo.

En ciertos materiales conocidos como conductores eléctricos los electrones exteriores están tan débilmente unidos al núcleo, que pueden ser expulsados todos ellos con facilidad y dejarlos vagar dispersos entre otros átomos, dichos electrones se les llama electrones libres.

CORRIENTE:

El movimiento dirigido de los electrones libres es lo que produce una corriente eléctrica.

Los electrones que son expulsados fuera de sus órbitas de alguna manera, producirán una escasez de electrones en el material que abandonan y un exceso de electrones en la zona que ocupan. Al exceso de electrones se le llama carga negativa y al déficit de electrones se le llama carga positiva. Cuando estas cargas existen y están en reposo, se tiene lo que se llama electricidad estática.

Los materiales que permiten el movimiento libre de los electrones se llaman conductores, cuando un electrón que se mueve se aproxima a otro, éste será empujado por el campo eléctrico del primero, sin que ninguno de los dos electrones se pongan en contacto, debido a que las cargas iguales se repelen y a que todos los electrones son negativos.

El flujo de corriente es el movimiento de los electrones a través de un material. Se mide el flujo de corriente cuando se mide el número de electrones que pasan por un punto dado en un periodo determinado de tiempo. Un Coulomb es la medida del número de electrones presentes y es igual a 6.289×10^{18} electrones. La unidad del flujo de corriente es el Ampere que se define como el flujo de un Coulomb por segundo.

VOLTAGE:

Para obtener ó mantener una diferencia de carga entre dos puntos se necesita energía. Cuando se conecta un conductor entre éstos dos puntos, fluirá una corriente. Al gasto de energía se le llama trabajo. Para separar dos cargas eléctricas se necesita trabajo; entonces, por consiguiente, se produce un trabajo cuando las cargas se acercan.

Las cargas separadas ó diferencia de potencial representan la capacidad para desarrollar trabajo. Se pueden emplear diversos tipos de energía para generar electricidad; esto es, para mantener una diferencia de potencial. Esta diferencia de potencial es lo que hace que los electrones se muevan y por tanto desarrollen trabajo ó sean empleados para generar otras formas de energía. Siempre que el movimiento de los electrones sea producido por un voltaje, se está desarrollando trabajo para moverlos.

La unidad para la diferencia de potencial es el Volt, que se define como la diferencia de potencial necesaria para obtener un Joule de trabajo cuando hay un flujo de carga de un Coulomb.

POTENCIA:

A la rapidez con que se efectúa el trabajo para mover a los electrones de un punto a otro se le llama potencia eléctrica. La unidad de potencia es el Watt que se define como la rapidez con que se efectúa trabajo en un circuito donde fluye una corriente de un Ampere cuando el voltaje aplicado es de un Volt.

1.2 SISTEMAS DE CORRIENTE ALTERNA.

En circuitos de corriente alterna la dirección del flujo de corriente se invierte periódicamente; en cierto instante fluirá en una dirección y en el siguiente fluirá en dirección opuesta.

Más del 90% de todas las líneas de potencia eléctrica llevan corriente alterna debido a que la transmisión de potencia eléctrica es más sencilla y más económica que la transmisión con corriente directa. También el voltaje de corriente alterna se puede elevar ó reducir en forma fácil y sin pérdida apreciable de potencia con el uso de transformadores. Lo anterior es debido a las pérdidas por efecto Joule en los conductores de transmisión, las cuales

pueden reducirse mediante el empleo de transformadores elevadores de voltaje que reducen la corriente, requiriéndose cables de menor sección transversal.

Gaulard y Gibbs inventaron el transformador en 1883, el cual se utilizó en sistemas de transmisión de corriente alterna monofásicos como el de Turin, Italia que tenía 40 Km de longitud en el año de 1884 y el de Estados Unidos en 1886.

SISTEMAS TRIFÁSICOS:

La primera línea de transmisión trifásica se construyó en 1891 en Alemania, con una longitud de 180 Km y una tensión de 12000 Volts.

El sistema de corriente alterna trifásica se desarrolló rápidamente y es actualmente de empleo general, ya que presenta la ventaja de que la potencia total suministrada es constante, siempre que el sistema trifásico sea equilibrado.

A partir de la introducción de la transmisión con corriente alterna trifásica a fines del siglo pasado, la cantidad de energía transmitida, la longitud de las líneas y la tensión de transmisión han aumentado constantemente.

FRECUENCIA:

En lo que se refiere a la frecuencia eléctrica utilizada en los sistemas de corriente alterna, inicialmente se prefirieron frecuencias bajas para disminuir las reactancias inductivas de las líneas y por razones de diseño de los motores de tracción, lo que hizo que se extendiera el uso de la frecuencia de 25 Hz. Posteriormente se fue imponiendo el uso de frecuencias entre 50 y 60 Hz debido a resultados de experimentación con lámparas incandescentes que mostraban el "parpadeo" de las lámparas de acuerdo a la frecuencia utilizada y debido a que con una frecuencia mayor se pueden utilizar circuitos magnéticos de menor sección para una potencia dada, como los que usa el ejército de los Estados Unidos para su equipo especializado de 400 Hz.

1.3 DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA.

El desarrollo de los sistemas eléctricos de potencia ha tenido gran auge en la actualidad debido a que representan un elemento de primordial importancia en el desarrollo de los países; se han hecho esfuerzos técnicos considerables para la creación de centros de generación hidroeléctrica, termoeléctrica, ó de energía nuclear, así como en el diseño

y construcción de líneas de transmisión de Extra Alta Tensión.

Para transportar económicamente energía a distancias considerables, es necesario que la tensión sea muy elevada, como la tensión de transmisión es demasiado elevada para su utilización directa, es conveniente reducirla por medio de transformadores para su distribución a valores convenientes. Aunque las tensiones elevadas permiten reducir la sección de los conductores, la economía del cobre ó del aluminio, puede anularse por el aumento del costo del aislamiento de la línea y de sus estructuras de soporte.

ELEMENTOS QUE LO FORMAN:

En una forma simple se puede decir que un sistema eléctrico de potencia se encuentra formado por varios elementos que se interconectan entre sí, tales como generadores, líneas y transformadores; de tal forma que permiten generar, transmitir, distribuir y consumir energía eléctrica.

Los sistemas modernos de transmisión de corriente alterna constan generalmente de los siguientes elementos:

1. Central Generadora.
2. Estación transformadora elevadora.
3. Líneas de transmisión.
4. Estaciones de maniobra.
5. Estaciones transformadoras reductoras.
6. Líneas ó redes primarias de distribución.
7. Bancos transformadores de servicio.
8. Líneas ó redes secundarias.

Esencialmente, los elementos 2,3,4,5 constituyen el sistema de transmisión y los elementos 6,7,8 constituyen el sistema de distribución. La función del sistema de distribución es el suministro de energía desde las estaciones generadoras ó desde las subestaciones del sistema de transmisión hasta los abonados.

Un sistema eléctrico de potencia típico consta de la central generadora donde se produce la energía y se transmite a las barras, luego se eleva a la tensión de transmisión por medio de transformadores. La energía circula por la línea de transmisión hasta la subestación situada a las afueras de la población donde se reduce el voltaje y se transmite a las barras de la subestación desde donde se conduce a diversas subestaciones de distribución

esparcidas por la ciudad donde se reduce la tensión para distribuirla a los consumidores. (Fig. 1.1)

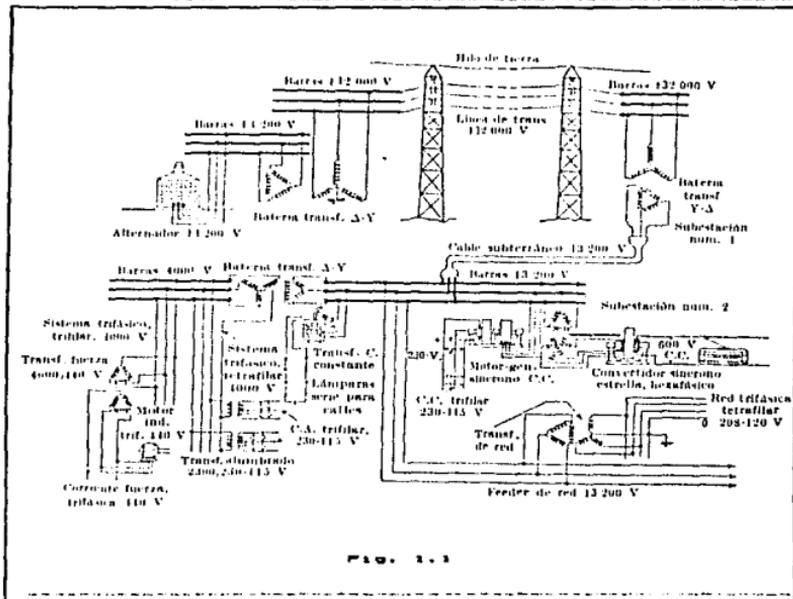


FIG. 1.1

CONDICIONES DE OPERACION:

En un sistema de potencia, desde la generación hasta el consumo de la energía eléctrica, se requiere mantener el

suministro de energía en forma continua, es decir, con un mínimo de interrupciones y en la cantidad que los distintos tipos de usuarios requieran, lo anterior se debe cumplir considerando que la carga de un sistema eléctrico varía a cada momento y para cualquier valor que tenga se deben satisfacer las condiciones de calidad, ya que la industria depende fuertemente de la energía eléctrica para su funcionamiento y por otro lado los sectores residencial, comercial y rural requieren de un buen servicio.

La calidad del suministro de energía eléctrica queda definida por los siguientes tres factores: continuidad del servicio, regulación del voltaje y control de la frecuencia.

Para asegurar la continuidad del suministro deben tomarse las disposiciones necesarias que van desde disponer de una reserva de generación adecuada hasta la disposición del sistema de protección automático.

Respecto a la regulación de voltaje, una variación de $\pm 5\%$ del voltaje en los puntos de utilización, con respecto al voltaje nominal, se considera satisfactoria; una variación de $\pm 10\%$ se considera tolerable, debido a que los aparatos que funcionan con energía eléctrica están diseñados para operar a un voltaje determinado y su funcio-

namiento es satisfactorio siempre que el voltaje aplicado no varíe más allá de éstos límites; por ejemplo, las lámparas incandescentes, cuya intensidad luminosa varía directamente a la variación del voltaje.

Para el control de la frecuencia puede decirse que desde el punto de vista del buen funcionamiento de los aparatos utilizados es suficiente controlar la frecuencia con una precisión de $\pm 1\%$, sin embargo los sistemas modernos controlan la frecuencia con una precisión del orden de ± 0.05 Hz; para el caso del motor de inducción se tiene para la velocidad la ecuación $v=120f/p$ donde p es el número de polos y f es la frecuencia, si la frecuencia varía en un proceso que requiere velocidad constante el resultado puede ser depreciable.

1.4 COMPONENTES DE LAS LINEAS DE TRANSMISION AEREAS.

Una línea de transmisión de energía eléctrica consta de conductores, aisladores y estructuras de soporte.

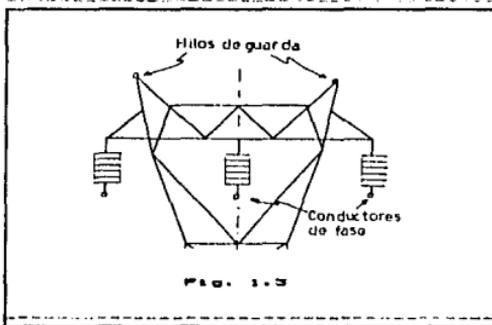
CONDUCTORES:

Los conductores para las líneas de alta tensión aéreas son siempre desnudos. Pueden ser de hilos de cobre reunidos formando cuerda, ó de aluminio con refuerzo de acero. Generalmente se prefieren éstos últimos por ser más ligeros y económicos. Cuando la línea es muy larga, los conductores deben tener empalmes con poca resistencia eléctrica y mucha resistencia mecánica. (Fig. 1.2)



Los conductores de tierra ó cables de guarda son los dos conductores desnudos sujetos a la parte más alta de las torres de la línea. Estos conductores sirven para apanta-

llar la línea e interceptar los rayos para que no alcancen a los conductores activos situados debajo. Estos cables de guarda normalmente no conducen corriente alguna, por lo que se hacen de acero y se conectan sólidamente a tierra en cada torre. (Fig. 1.3)



AISLADORES:

Los conductores de las líneas están eléctricamente aislados entre sí y también del poste ó la torre por medio de elementos no conductores denominados aisladores. Para determinar si un aislador puede ser utilizado ó no, deben considerarse su resistencia mecánica y sus propiedades eléctricas. Los materiales más prácticos para aisladores son la porcelana y el vidrio. La porcelana puede soportar

grandes cargas al ser comprimida, pero se rompe con facilidad al ser sometida a una tensión (mecánica), es decir, a un esfuerzo de tracción. Por consiguiente, al utilizar un aislador de porcelana se debe procurar que las fuerzas ejercidas sobre él actúen por compresión y no por tracción.

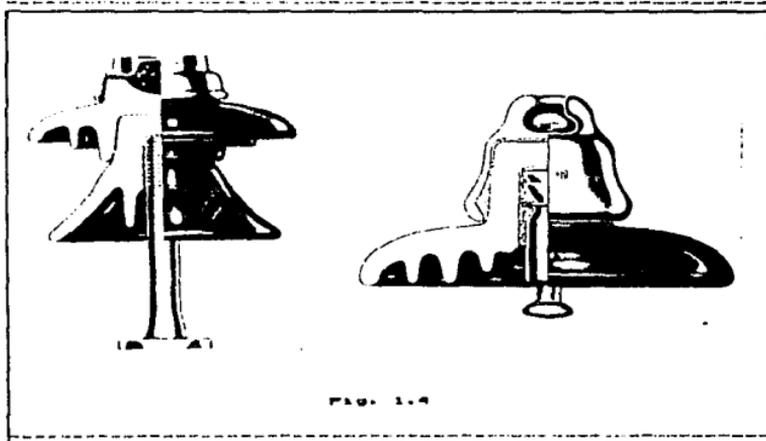
Aunque los aisladores de vidrio son buenos para baja tensión, el empleo de los aisladores de porcelana se ha extendido mucho más debido a que resultan más prácticos. La porcelana tiene dos ventajas sobre el vidrio:

1. Puede soportar mayores diferencias de temperatura, ó sea que no se cuartea cuando está expuesta a temperaturas muy altas ó muy bajas.
2. La porcelana no es tan frágil como el vidrio y no se rompe con tanta facilidad durante el transporte ó la instalación.

Bajo el punto de vista eléctrico los aisladores deben presentar mucha resistencia ante las corrientes de fuga superficiales y deben tener suficiente espesor para evitar la perforación ante el fuerte gradiente de tensión que deben soportar. Para aumentar la línea de fuga y por lo tanto su resistencia se moldean en forma acampanada. Bajo

el punto de vista mecánico deben ser suficientemente robustos para resistir los esfuerzos debidos al peso de los conductores.

Existen dos tipos principales de aisladores, los que van fijados a un espárrago y los que van suspendidos. Los primeros tienen varias campanas de porcelana, fijándose el conductor en su parte superior. Al aislador va fijado un espárrago de acero que permite fijarlo a un soporte. (Fig. 1.4)



Los aisladores de espiga se atornillan en los soportes instalados en la cruceta. El conductor eléctrico va montado en el aislador. Los aisladores de espiga se hacen de porcelana ó vidrio y pueden pesar de 280 g a 400 Kg. Este tipo de aislador se utiliza en circuitos de distribución rural y urbana y por lo general se hace de una pieza sólida de porcelana ó vidrio.

En las líneas de transmisión de alta tensión se emplean aisladores de espiga más grandes y más fuertes. La diferencia en la construcción estriba en que están compuestos por dos ó tres piezas de porcelana cementadas en forma conjunta denominadas campanas. Han sido concebidas para que el agua de lluvia y la polución se desprenda con facilidad. Se les conoce como aisladores de columna.

Los aisladores de uso más común son los de espiga y los de suspensión (ó colgantes). El aislador de espiga ó columna levanta el conductor por encima de la cruceta, mientras que el aislador de suspensión lo deja colgando debajo de ella.

Cuanto más elevada es la tensión, más aislamiento se necesita. Con tensiones muy altas el aislador de espiga ó columna se hace demasiado voluminoso y difícil de manejar,

por lo que no resulta práctico, y el soporte que debe sujetarlo tendría que ser desmesuradamente largo y grande. Con el fin de resolver el problema se inventaron los aisladores de suspensión. El conjunto de aisladores de suspensión se llama cadena y la cantidad de unidades que la componen depende de la tensión, las condiciones meteorológicas, el tipo de estructura empleada para la transmisión y del tamaño del aislador utilizado. En una cadena de aisladores de suspensión, se puede cambiar uno ó varios de ellos sin necesidad de hacer lo mismo con todo el conjunto.

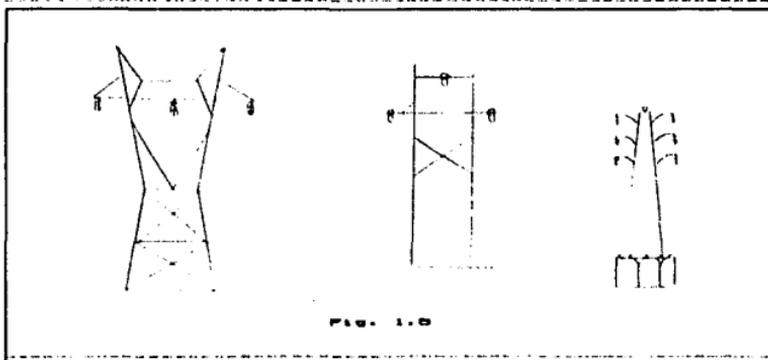
ESTRUCTURAS DE SOPORTE:

Los soportes se fijan a las crucetas y se utilizan para atornillar firmemente en ellos los aisladores de espiga. La distancia que los soportes deben guardar entre sí en las crucetas debe ser tal que quede espacio suficiente entre los conductores para que la corriente eléctrica no salte ó produzca chispas de un conductor a otro. También una separación suficiente es necesaria para impedir que los alambres se toquen entre un poste y otro al ser mecidos por el viento. En una cruceta estándar para 3 soportes, la separación entre éstos es de 37 cm. El espacio que se deja

entre los primeros soportes situados a ambos lados del poste es de 76 cm.

En líneas de Alta Tensión y Extra Alta Tensión se emplean siempre torres metálicas formadas por perfiles de acero galvanizado soldados, remachados ó atornillados.

Los postes de acero, que ordinariamente consisten en ángulos y canales de acero unidos por estructuras reticulares, se suelen emplear como estructuras de soporte cuando se dispone de un espacio estrecho para el tendido de la línea, como ocurre en los camellones de separación de carreteras. Los postes de acero más empleados son telescópicos, reforzados al nivel del suelo por un tubo corto de fierro, ó revestimiento de concreto que sobresale unos 50 cm para soportar la corrosión intensa en ese lugar. En condiciones favorables de humedad, el contacto del poste con el subsuelo puede ser suficiente para los fines de protección. (Fig. 1.5)



Algunos términos relacionados con las líneas de transmisión aéreas son:

DERECHO DE VIA:

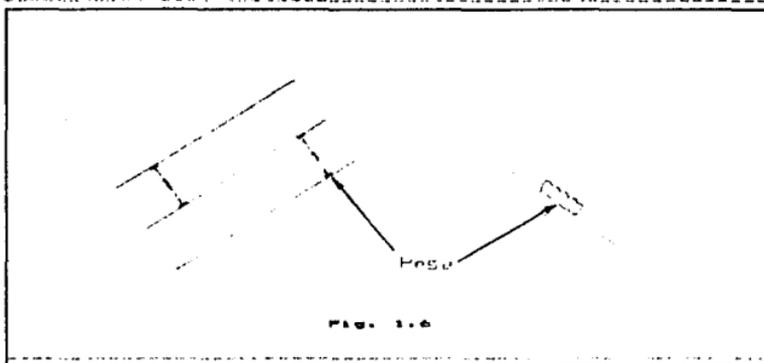
El derecho de vía es la franja de terreno con fines de protección y seguridad de una línea de transmisión con un ancho determinado que esté en función de su tensión, longitud promedio del claro, número de circuitos y tipos de estructuras; el derecho de vía está restringido por otras líneas de conducción & de comunicación, vías férreas, carreteras, canales, pozos petroleros, aeropuertos, unidades habitacionales, zonas industriales, fraccionamientos, etc.

CLARO Y FLECHA:

La distancia de separación entre soportes se denomina claro y la flecha es la distancia vertical entre una línea recta que une los dos puntos de apoyo del cable y el punto más bajo del conductor, el cuál no se mantiene horizontal, sino que cuelga debido a su propio peso.

SEPARADOR DE CONDUCTORES:

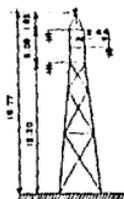
Si se deposita sobre una línea un trozo de nieve habiendo viento al mismo tiempo, pueden empezar a moverse los conductores (movimiento oscilatorio), en determinadas condiciones éstas oscilaciones pueden ser tan amplias que provocan cortocircuitos entre las fases ó hacen restallar (rompimiento del conductor acompañado de un gran estruendo acompañado de varias chispas) los conductores. Para soslayar éste problema a veces se lastran las líneas con pesas que amortiguan mecánicamente las oscilaciones ó impiden que éstas se acentúen. (Fig. 1.6)



1.5 TIPOS NORMALIZADOS DE TORRES DE TRANSMISION.

La Comisión Federal de Electricidad posee formas normalizadas de torres de transmisión en donde se indican las diferentes medidas de las estructuras, el claro promedio, voltaje de transmisión, uno ó dos circuitos, uno ó dos cables de guarda. Dentro de las medidas de las estructuras se incluye la altura total de la torre, separación entre conductores, distancia de los conductores al centro de la torre y la altura de sujeción de los aisladores.

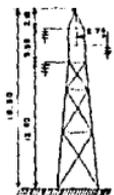
Las torres para uno ó dos circuitos en un sólo plano horizontal, emplean dos cables de guarda en la parte más alta. Las torres para un circuito en triángulo, tienen dos crucetas de un lado y la tercera del otro lado, con un sólo cable de guarda. Las torres para dos circuitos en hexágono tienen tres crucetas dobles en niveles diferentes, uno ó dos guardas, y con circuitos separados a uno y otro lado. Para que al aumentar la flecha del conductor central por una causa cualquiera, no se acerque demasiado al conductor inferior, la cruceta central es más larga que las otras. (Figs. 1.7 a 1.9)



69 KV



CLARO PROMEDIO 190 m

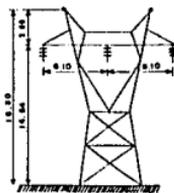


115 KV



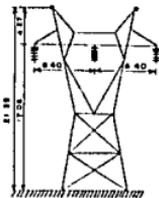
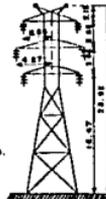
CLARO PROMEDIO 240m

FIG. 1.7



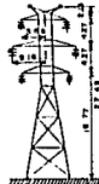
138 KV

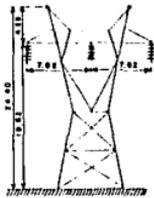
CLARO PROMEDIO 300 m.



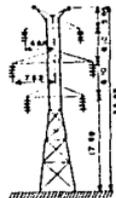
161 KV

CLARO PROMEDIO 300 m.

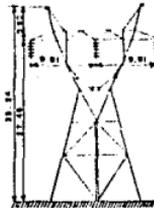




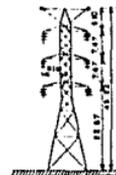
230 KV



CLARO PROMEDIO 300m.



287 KV



CLARO PROMEDIO 300m.

FIG. 1.7

En México las tensiones normalizadas son:

En alta tensión 400, 230, 85 y 23 Kv.

En baja tensión 400, 220 y 127 V.

Las tensiones usadas en los sistemas son:

En transmisión 400 y 230 Kv.

En subtransmisión 115, 85, 34.5, 23, 13.8 Kv.

En distribución primaria 2.4, 4.16, 13.8 Kv.

En distribución secundaria 440, 220, 127 V.

1.6 CLASIFICACION DE LAS LINEAS DE TRANSMISION.

Las líneas de transmisión aéreas pueden clasificarse en tres formas diferentes:

CLASIFICACION POR VOLTAJE-DISTANCIA:

Esta clasificación se realiza de acuerdo a la tensión de transmisión y a la distancia que cubren:

LINEAS CORTAS. No más de 60 Km de longitud y de voltajes no mayores de 40 Kv, aproximadamente.

LINEAS MEDIAS. Entre 60 y 250 Km y voltaje no mayor que 220 Kv, aproximadamente.

LÍNEAS LARGAS. Más de 250 Km y más de 220 Kv.

CLASIFICACION POR TENSION:

LÍNEAS DE ALTA TENSION. Enlazan las subestaciones con las centrales generadoras y trabajan a tensiones inferiores a 230 Kv.

LÍNEAS DE EXTRA-ALTA TENSION. Se emplean cuando el centro de producción está muy alejado del centro de consumo, trabajan a tensiones de hasta 800 Kv y cubren distancias de hasta 1000 Km.

Se encuentran en investigación y en México no existen arriba de 400 Kv.

Existen dentro de esta clasificación las líneas de baja tensión pero no corresponden a líneas de transmisión aéreas, sino a líneas de instalaciones eléctricas industriales y residenciales.

CLASIFICACION POR LONGITUD:

Esta clasificación únicamente toma en cuenta la longitud.

LINEAS CORTAS. De menos de 80 Km.

LINEAS MEDIAS. Entre 80 y 240 Km.

LINEAS LARGAS. De más de 240 Km.

La existencia de éstas tres clasificaciones se debe a los cambios constantes que han habido en los conceptos de transmisión al introducirse la Extra Alta Tensión y aumentar considerablemente los volúmenes de generación.

CAPITULO 2.
EFFECTO CORDONA.

CAPITULO 2.EFECTO CORONA.

2.1 DESCRIPCION DEL EFECTO CORONA.

El efecto corona se presenta cuando el potencial de un conductor en el aire se eleva hasta valores tales que sobrepasan la rigidez dieléctrica del aire que rodea al conductor. El efecto corona se manifiesta por luminiscencia ó circunferencias azuladas que aparecen alrededor del conductor, concentradas en las irregularidades de su superficie. La descarga va acompañada de un sonido silbante y de olor de ozono. Si hay humedad apreciable se produce ácido nitroso.

La corona se debe a ionización del aire. Los iones son repelidos y atraídos por el conductor a grandes velocidades, produciéndose nuevos iones por colisión. El aire ionizado resulta conductor (de alta resistencia) y aumenta el diámetro eficaz del conductor metálico.

2.2 CONDICIONES DE APARICION DEL EFECTO CORONA.

Los materiales que tienen muy pocos electrones libres son aisladores. En estos materiales, se requiere de una gran cantidad de energía para extraer a los electrones fuera de la órbita del átomo. Aún entonces, sólo se pueden liberar pocos a la vez. Otro nombre que se le da a los aisladores es el de dieléctrico.

El aire atmosférico es uno de los mejores aislantes conocidos. No obstante, a temperatura muy alta se convierte en un buen conductor debido al fenómeno de ionización. Cuando se eleva la temperatura entre 5000 y 50000°C, la conductividad del aire se aproxima a la del agua salada.

El objetivo principal de un dieléctrico ó aislador es el de evitar que circulen corrientes apreciables cuando queda sometido a una diferencia de potencial, no obstante, un dieléctrico no puede soportar tensiones cada vez más altas. Cualquiera dieléctrico pierde sus propiedades aislantes y se perfora a una cierta tensión, incluso los gases como el aire.

La perforación del aislante gaseoso, tal como el aire, se debe a la presencia de una tensión excesiva que provoca la ionización del gas y que se da de la siguiente manera: considerando dos placas conductoras separadas por un gas aislante tal como el aire y aplicando una tensión entre placas, los ocasionales electrones libres que siempre se encuentran en un gas (ya sea por radiaciones cósmicas, rayos, etc.) se aceleran hacia la placa positiva, y en su rápido desplazamiento chocan con los átomos neutros. Si la tensión va aumentando gradualmente, la velocidad puede ser tal que el choque sea suficientemente violento para liberar uno ó más electrones del átomo, y éstos electrones, salidos de su órbita, son acelerados liberando así más electrones. El gas se enriquece súbitamente con multitud de electrones libres, empezando a circular una corriente apreciable. Cuando el campo eléctrico (expresado en Kv/m) alcanza un valor de 30, el gas se hace conductor. (Fig. 2.1)

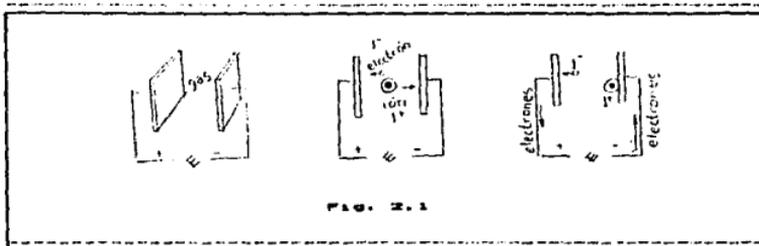


FIG. 2.1

Los electrones arrancados de sus órbitas se apartan de los átomos, que ahora tienen una carga positiva. Estos átomos cargados positivamente se denominan iones positivos. Puesto que en un gas éstos iones positivos pueden desplazarse libremente, se irán acercando paulatinamente hacia la placa negativa mientras que los electrones libres lo hacen más rápidamente hacia la placa positiva.

Tan pronto como un ión positivo toca la placa metálica negativa, captura uno de los millones de electrones libres existentes en ella, con lo que el ión se convierte inmediatamente en un átomo simple del gas (eléctricamente neutro). Los electrones capturados por los iones son sustituidos inmediatamente por otros electrones libres que lleguen a la placa positiva.

Por el circuito formado por la fuente, las placas y el gas circula una corriente moderada llamada corriente de ionización. Si se va aumentando la tensión, ésta corriente se va incrementando hasta que se produce un arco: éste arco eléctrico luminoso es consecuencia de la emisión de fotones de los electrones entre los átomos del gas. cuando éstos electrones pasan de órbitas exteriores a órbitas interior-

res, la energía atómica se libera en forma de fotones (luz visible). Así, la ionización de un gas va acompañada siempre de la emisión de energía radiante (visible, ultravioleta ó infrarroja).

En las líneas de transmisión, la distancia entre conductores es mayor que su radio, al existir una diferencia de potencial entre conductores se tiene una intensidad de campo eléctrico, cuando la intensidad del campo eléctrico excede la rigidez dieléctrica del aire, en la superficie de los conductores aparece el efecto corona.

El conocimiento del efecto corona es aún incompleto, siendo objeto de estudios y experimentos por parte de investigadores. Los mayores conocimientos del efecto corona son debidos al trabajo de F.W. Peek Jr. que había pertenecido a la General Electric Company, y a los experimentos llevados a cabo en la universidad Leland Stanford por varios investigadores, entre los cuales figuran J.S. Carroll, M.M. Rockwell, Bradley Cozzens y W.S. Petersen.

Ninguna de las fórmulas que hoy se utilizan para calcular las tensiones de corona y las pérdidas son exactas

y por lo tanto sólo pueden esperarse resultados aproximados.

La rigidez dieléctrica se define como el máximo gradiente de potencial que un aislante es capaz de soportar sin que se produzca una descarga disruptiva. (La rigidez del aire es de 30 KV/cm).

La descarga disruptiva no es más que una corriente eléctrica que se presenta en los dieléctricos que están sometidos a la acción de un campo eléctrico, debido a que las fuerzas coercitivas de los átomos del dieléctrico, son menores que las fuerzas que tratan de mover los electrones.

El efecto corona se puede explicar en forma semejante a la descarga en gases, ya que debido a la incidencia de radiaciones y otras causas, existen moléculas ionizadas en el aire, éstas moléculas han perdido uno ó más de los electrones que les corresponden y por tanto tienen cargas eléctricas positivas. Debido a la diferencia de potencial entre las líneas, el campo electrostático acelera la partícula aumentando su energía cinética, provocando choques con otras partículas (ionización por impacto).

En la aparición del efecto corona en una línea se pueden diferenciar varios tipos de descargas:

1. DESCARGA DE PUNTAS, aparece al aumentar el gradiente superficial; se puede medir una pequeña pérdida de energía.
2. DESCARGA O CORONA DE TRANSICION, aparece una luminosidad tenue en las partes rugosas del conductor, además un ruido siseante.
3. CORONA LUMINISCENTE, aparece un halo luminoso alrededor de todo el conductor y se percibe el olor característico del ozono.

Los tipos anteriores de descargas son conforme va apareciendo el fenómeno, puesto que cuando el potencial del conductor va creciendo a partir de cierto límite, se produce en primer lugar una ionización invisible en los puntos más salientes y rugosidades del conductor. La extensión de las áreas afectadas va en aumento, y llega a cubrir toda la superficie del conductor. Después la ionización gana en volumen a medida que sube el potencial, se hace sonora y visible, cada vez más, hasta que una descarga violenta entre polos opuestos inicia un arco que obliga a suspender la corriente y el servicio de la línea. (Fig. 2.2)

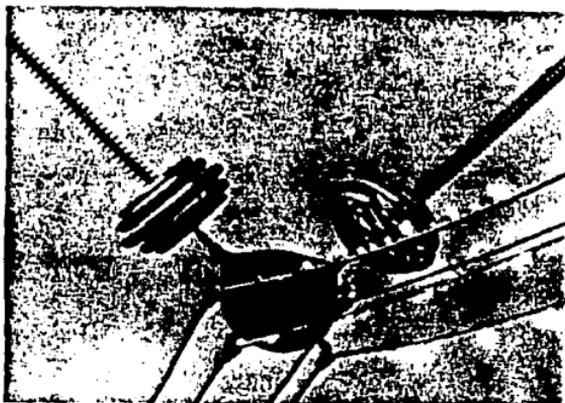


FIG. 2.2

La tensión de trabajo normal de la línea no debe jamás llegar al extremo más alto del fenómeno; pero tampoco debe permitirse que sobrepase exageradamente al valor crítico de ionización, por largo tiempo, a cause de los efectos nocivos sobre los conductores y el sistema, que son:

- a) Corrosión del metal por el ozono y compuestos de oxígeno y nitrógeno, cuya formación se debe a la ionización del aire, y que la humedad favorece en gran manera, por la aparición de ácido nitroso.

- b) Predisposición a recibir descargas atmosféricas directas, por la presencia de iones abundantes alrededor de los conductores.

- c) Radio-interferencia.

- d) Disipación de energía.

2.3 RADIO-INTERFERENCIA.

En las líneas de transmisión el efecto corona origina pérdidas de energía y, si alcanza cierta importancia, produce corrosiones en los conductores a causa del ácido formado. Se ha comprobado que el efecto corona concentrado en puntas agudas y cantos vivos de piezas ó accesorios, produce interferencias en la radio, especialmente en ondas cortas al provocar oscilaciones electromagnéticas de alta frecuencia que se transmiten en toda la línea.

Las ondas electromagnéticas se propagan a lo largo de los conductores en forma de ondas errantes, otras se propagan hacia el espacio, pero son fuertemente amortiguadas y su valor resulta de poca importancia en comparación con las que se propagan a lo largo de los conductores.

El efecto corona se presenta en las líneas cuando el voltaje se aproxima a su valor pico; por lo tanto la corriente que alimenta el efecto corona circula discontinuamente, en forma de descarga y contiene un gran número de armónicas que causan que la línea emita radiaciones de energía de alta frecuencia. La frecuencia de estas radiaciones varía entre 5 y 10 Megahertz, que corresponde a parte de la banda de frecuencias de radio de amplitud Modulada y puede interferir con las señales de radiodifusión, en los receptores próximos a la línea de transmisión. El rango de frecuencias indica que no ocurren interferencias con las señales de televisión ni de Frecuencia Modulada.

El efecto corona produce interferencia en los receptores próximos a la línea de transmisión cuya variación se debe al voltaje de cada línea y la distancia a la que se encuentra el aparato receptor.

Los ruidos de radiofrecuencia causados por el efecto corona se atenúan muy rápidamente con la distancia, en receptores muy próximos a la línea la interferencia depende tanto de la energía radiada por la línea como de la intensidad de la señal de radio en la localidad, la cual

depende de la potencia de la emisora y de su distancia al lugar.

Para eliminar completamente las interferencias de radio de los receptores domésticos, la potencia de la señal de la emisora debe ser por lo menos 40 veces mayor que la de la interferencia. Con una relación de 25 a 1 la recepción es aceptable y con una relación de 10 a 1 la recepción es prácticamente imposible.

2.4 VOLTAJE CRITICO DISRUPTIVO.

El voltaje llamado "crítico" en realidad corresponde a un valor teórico, puesto que se supone que abajo de él no hay ionización y arriba de él sí la hay; pero mediante investigaciones se ha demostrado que existe ionización abajo del punto crítico acompañada de pequeñas pérdidas.

La tensión crítica en una línea depende de dos factores básicos: del gradiente superficial crítico en la superficie del conductor, y de la rigidez específica del aire, a la presión y temperatura actuales junto al conductor.

El primer factor se determina por el potencial r.m.s. ó eficaz al neutro, el radio del conductor y un coeficiente que representa el estado y clase de la superficie del conductor, y cuyo valor es 1.0 para cilindros pulidos con una sección perfectamente circular. El segundo factor depende de la presión atmosférica y la temperatura absoluta y se conoce como el factor de densidad del aire.

Para el aire la ionización por choque aparece para una temperatura de 25°C y una presión atmosférica de 760 mm de columna de mercurio, cuando el gradiente de potencial alcanza un valor pico de 30 Kv/cm que corresponde a un valor eficaz de 21.21 Kv/cm.

El valor del gradiente de potencial en la superficie del conductor para el cuál se inicia la ionización por choque se llama gradiente superficial crítico y se representa por g_0 .

Investigaciones realizadas por F. W. Peek dan la expresión para calcular g_0 :

$$g_0 = 30(1+0.3/r)$$

para las condiciones de 25°C y 760 mm de columna de Hg, r es el radio del conductor en cm y g_0 está dado en Kv pico por cm.

Investigaciones más recientes, realizadas en la estación experimental de electricidad de Chevilly, en Francia, dan la expresión para g_0 , con 25°C y 760 mm de columna de Hg para conductores de radio comprendido entre 0.7 y 2.5 cm:

$$g_0 = 30(1 - 0.07r)$$

donde r es el radio del conductor en cm y g_0 está en Kv eficaz por cm.

Como la presión atmosférica y la temperatura absoluta influyen en el valor del gradiente superficial crítico, estos dos factores al combinarse forman el factor de densidad del aire que está dado por:

$$\delta = 3.92b / (273 + t)$$

donde b es la presión barométrica en cm de columna de Hg y t es la temperatura ambiente en °C.

Por lo que para F. W. Peek el gradiente superficial crítico para las condiciones atmosféricas definidas por el factor de densidad del aire es:

$$g_0' = 30\delta[(1 + 0.3)/\sqrt{F}] \text{ Kv pica/cm}$$

Investigaciones de Peterson dan la expresión del gradiente superficial crítico como:

$$g_0' = g_0 \delta^{0.75}$$

donde g_0 está dado para 25°C y 760 mm de columna de Hg.

Las expresiones anteriores son para conductores cilíndricos de sección perfectamente circular, con superficies perfectamente limpias y sin ninguna aspereza. Como los conductores de las líneas de transmisión están generalmente constituidos por cables formados por varios hilos trenzados y nunca están perfectamente limpios, la ionización se produce en las irregularidades de la superficie para un gradiente superficial menor que el necesario para producirla si la superficie del conductor fuera lisa y limpia.

El gradiente superficial crítico toma en cuenta esta reducción al utilizar un factor de superficie "m" que se forma con el producto de un cociente de forma "mf" y un coeficiente de superficie "ms".

Los valores del coeficiente de forma son:

- 1.0 para una sección perfectamente circular.
- 0.85 para un cable con 6 hilos en la capa exterior.
- 0.9 para un cable con 12 a 30 hilos en la capa exterior.

Los valores del coeficiente de superficie son:

- 0.9 para cables limpios ó envejecidos.
- 0.8 para cables nuevos.
- 0.7 para cables sucios ó engrasados.
- 0.5 a 0.3 para cables recubiertos de gotas de agua.

Por lo que el gradiente superficial crítico queda según Peterson como:

$$g_c = 30m^{2/3}(1-0.07r) \text{ Kv eficaz/cm}$$

Cuando el gradiente de potencial en la superficie del conductor alcanza el valor del gradiente superficial crítico, el voltaje al neutro correspondiente se llama voltaje crítico disruptivo, V_0 y es el voltaje eficaz al neutro en Kv para el cuál se inicia la ionización por choque del aire que rodea al conductor. Para una línea trifásica de un conductor por fase se tiene:

$$V_0 = 30m^{2/3}(1-0.07r)r \text{Ln D.M.G./r Kv r.m.s.}$$

Aplicando las propiedades de los logaritmos $\text{Ln}_e = 2.3026 \text{ Log}_{10}$ se tiene:

$$V_0 = 69.078m^{2/3}(1-0.07r)r \text{Log}_{10} \text{ D.M.G./r Kv r.m.s.}$$

Para una línea trifásica con conductores múltiples por fase se tiene que el gradiente superficial crítico está dado por:

$$g_c = 30m^{2/3}(1-0.07r) (1 - (n-1)r/R) \text{ Kv/cm}$$

donde R es el radio geométrico.

Por lo que se tiene que el voltaje crítico disruptivo para una línea trifásica con conductores múltiples por fase y tomando en cuenta el efecto de tierra es:

$$V_0 = 69.078 m^2 / r^2 (1 - 0.07r) (1 - (n-1)r/R) n r \log_{10} D.M.O. / R.M.O. \\ \times \sqrt{2(H.M.O.)^2 / 4(H.M.O.)^2 + (D.M.O.)^2}$$

donde n es el número de conductores por fase.

2.5 PERDIDAS POR EFECTO CORONA.

La ionización por choque, ya sea local ó generalizada a toda la superficie del conductor, libera iones positivos y negativos. En cada semiciclo los iones que tienen signo opuesto al del conductor son atraídos y neutralizados por él; los que tienen el mismo que el conductor son repelidos y se alejan aglomerándose con moléculas neutras para formar grandes iones; a medida que se alejan van estando sometidos a un campo eléctrico más débil y su velocidad va disminuyendo. Antes de que la polaridad del conductor cambie alcanzan distancias del orden de algunas decenas de cm. Al cambiar la polaridad son atraídos y aumentan la carga y la intensidad del campo en la superficie del conductor, lo que causa que la ionización por choque se reinicie antes de que el voltaje haya vuelto a alcanzar el valor crítico. Las primeras cargas liberadas neutralizan las cargas que se acercan al conductor; después se forman

cargas de signo contrario que se alejan del conductor y el proceso se repite.

Las pérdidas por efecto corona en un conductor que funciona con un potencial de trabajo de KV kilovolts al neutro, crece con el cuadrado de ese potencial, con la frecuencia en Hertz, y con un factor empirico ó función F dado en relación con el cociente V_n/V_o que resulta de dividir la tensión de trabajo, entre la critica disruptiva. La fórmula es debida a Peterson y se expresa como:

$$P_c = 20.96 \times 10^{-9} f (KV_n)^2 F / (\text{Log}_{10} D.M.G./r)^2 \text{ Kw/Km/fase}$$

donde:

P_c son las pérdidas por efecto corona.
 f es la frecuencia en ciclos por segundo.
 KV_n voltaje eficaz al neutro en Kv.
 $D.M.G.$ distancia media geométrica entre los conductores.
 r radio del conductor.
 F factor empirico, función de V_n/V_o .
 V_n voltaje eficaz al neutro.
 V_o voltaje critico disruptivo.

Algunos valores del factor de pérdida por corona F en función de V_n/V_o son:

V_n/V_0	F
0.6	0.011
0.7	0.014
0.8	0.018
0.9	0.025
1.0	0.036
1.1	0.053
1.15	0.068
1.2	0.085
1.25	0.110
1.3	0.150
1.4	0.310
1.5	0.950
1.6	2.300
1.8	5.000
2.0	7.000
10.0	28.000
20.0	30.000

Los últimos valores de F son aplicables a la corona que se forma en las líneas cuando cae en ellas una descarga eléctrica de origen atmosférico, bajo esta condición la corona actúa como una válvula de seguridad, al absorber la energía de los rayos que atacan la línea.

La fórmula de Peterson se utiliza para calcular las pérdidas por efecto corona con buen tiempo. Las condiciones atmosféricas influyen considerablemente en la magnitud del efecto corona. La lluvia hace aumentar las pérdidas por este efecto a valores unos 10 veces mayores a los que se obtienen con buen tiempo.

Para determinar las pérdidas por corona de forma empírica se puede aplicar también la fórmula de F.W. Peek que establece:

$$P_c = 242/\delta r (f/25)^{1/7} (V-V_0)^2 \times 10^{-7} \text{ Kw/Km}$$

donde:

- δ es el factor de densidad del aire
- f frecuencia en ciclos por segundo
- r radio del conductor en cm
- D separación entre centros de conductores en cm
- V_0 tensión crítica disruptiva
- V tensión de fase a neutro de la línea en Kv.

La ecuación anterior se aplica a conductores de sección mayor al 10 A.W.G. (conductores de más de 5.3 mm²)

La humedad no afecta a la tensión crítica ni a las pérdidas, el humo disminuye la tensión crítica y aumenta las pérdidas, los vientos fuertes no ejercen efecto sobre la tensión crítica ni sobre las pérdidas; la niebla, la escarcha, las tempestades de lluvia y nieve disminuyen la tensión crítica y aumentan las pérdidas. La nieve produce un aumento notable de las pérdidas.

Al calcular las pérdidas por efecto corona, debe tenerse en cuenta que no toda la línea está al mismo potencial y que pueden existir diferencias importantes de amplitud. Por ello es necesario calcular las pérdidas en trozos cortos

para reducir los errores al mínimo e integrar los resultados parciales.

2.6 FACTORES QUE AFECTAN AL FENOMENO CORONA.

De lo visto anteriormente se pueden observar los factores que afectan al fenómeno corona:

- a) Las condiciones atmosféricas tales como la presión, la temperatura ambiente y la lluvia que afectan la ruptura dieléctrica del aire.
- b) Las irregularidades en la superficie de los conductores.
- c) El radio del conductor, ya que en la expresión que da el voltaje crítico disruptivo se ve que éste es directamente proporcional al radio del conductor. Por lo tanto para limitar el efecto corona en las líneas es necesario adoptar un diámetro del conductor lo suficientemente grande para que el coeficiente de seguridad (voltaje crítico disruptivo entre el voltaje al neutro de operación de la línea V_0/V_n) resulte mayor que uno; para condiciones atmosféricas despejadas.
- d) La distancia entre conductores. A mayor separación entre conductores se tienen menos problemas con el fenómeno corona y con las tensiones críticas disruptivas, pero aumentando la separación aumenta el costo de las torres y entonces las líneas se diseñan normalmente para operar justamente abajo de la tensión crítica disruptiva en las peores condiciones de clima.

En sistemas de más de 100 Kv entre hilos, el fenómeno corona alcanza una importancia extraordinaria que obliga al uso de conductores de diámetro aumentado artificialmente para evitar que el potencial de trabajo sea mucho mayor que el crítico. Entre los métodos empleados están:

- 1) Cables de cobre de varios hilos torcidos alrededor de un cable de acero forrado con cáñamo impregnado para resistir la humedad.
- 2) Cables de cobre formados por alambres dispuestos en una ó más capas sobre un núcleo del mismo metal, que tiene la forma de una vigueta en forma de doble T torcida en hélice en sentido contrario a los alambres de la capa más profunda. Hay necesidad de emplear piezas especiales para los empalmes y derivaciones, y cuidar que en los extremos no se desenrollen los hilos.
- 3) Cables de aluminio, formados por varias capas de alambres torcidos sobre un alma de acero que, a su vez, puede estar compuesta de uno, siete ó más alambres. La corriente circula por el aluminio, casi exclusivamente, y el acero sirve para dar resistencia mecánica al conjunto. Son muy empleados y se les designa con las letras ACSR.
- 4) Cables de cobre y acero, formados por 7, 19 ó más hilos, cada uno de los cuales tiene un núcleo de acero revestido de una cubierta de cobre. La designación comercial es "copperweld" ó "copperlead". También hay cables con núcleos de bronce fosforado y cubierta de cobre.
- 5) Conductores tubulares de cobre, formados por segmentos de corona machiembrados, con la superficie externa completamente lisa. Se les designa con las letras H.H.

- 6) Cables de cobre huecos, formados por un tubo central de lámina de cobre, a cuyo derredor se colocan alambres ó pequeños tubos del mismo metal, siendo la última capa formada con alambres y quedando protegida por una lámina de cobre que le da un aspecto liso. Designados por POCF.

- 7) Cables mixtos, con núcleo de uno ó dos conductores copperweld rodeados por 6 ó 12 conductores de cobre. La designación comercial es Copperweld-Copper.

Al proyectar una línea, con el fin de reducir las pérdidas por efecto corona, se puede actuar sobre tres factores:

1. El radio "r" del conductor.
2. La relación D/r ó sea, la separación.
3. El factor de irregularidad m.

La frecuencia y la tensión, en general, vienen impuestas ó han sido fijadas atendiendo á otras consideraciones. El factor m es casi intangible y no es fácilmente controlable. Cuanto más parecida sea la superficie del conductor á la de un tubo pulimentado, se estará en mejores condiciones para disminuir el efecto corona. Debe evitarse el uso de cables formados por hilos muy finos. La separación entre conductores puede aumentarse entre ciertos límites, pero si se exagera resulta antieconómica.

Para temperaturas distintas de 25°C, el valor de la tensión, ya modificado con arreglo a la presión barométrica, debe ser corregido para la temperatura deseada t_1 , para lo cual se multiplica por el factor de corrección de temperatura $298/(273 + t_1)$, donde 298 es la temperatura absoluta a 25°C y $(273 + t_1)$ es la nueva temperatura absoluta considerada.

Cuando los conductores de la línea se encuentran en un mismo plano, se toma para el conductor central el 96% de los valores corregidos y para los conductores extremos el 106%. Los valores en tiempo lluvioso deben tomarse el 80% de los correspondientes a buen tiempo.

CAPITULO 3.
SOBRETENSIONES EN
LINEAS DE TRANSMISION.

CAPITULO 3.

SOBRETENSIONES EN LINEAS DE TRANSMISION.

3.1 TEORIA DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS.

Las descargas atmosféricas han representado un problema para los sistemas de transmisión de energía eléctrica ya que la mayoría de las fallas son debidas a éste tipo de fenómenos.

El estudio de las descargas atmosféricas fué iniciado por Franklin en 1740 a partir de las teorías para electricidad estática. Actualmente se dispone de algunas teorías para tratar de explicar su origen y algunos experimentos para estudiar sus efectos.

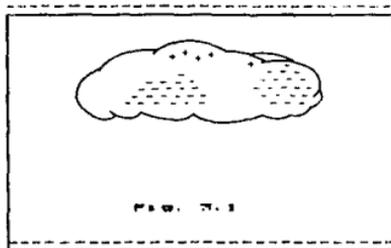
Experimentalmente se ha comprobado que la tierra representa un electrodo negativo y a una distancia de 100 a 150 Km sobre su superficie se encuentra una capa de aire que representa el electrodo positivo. Cuando las corrientes de aire entre la tierra y ésta capa producen una ionización

alta, se establece una descarga de iones, que si su valor es elevado puede degenerar en una descarga eléctrica.

Para explicar el fenómeno de la descarga eléctrica existen algunas teorías, entre las que se encuentran las siguientes:

TEORIA DE SIMPSON:

Manifiesta que la formación de cargas eléctricas en las nubes se debe a corrientes de aire que se encuentran en actividad en su interior. Las corrientes ascendentes de aire transportan vapor húmedo del mar & de la superficie de la tierra, éste vapor al encontrarse a determinada altura y bajo condiciones atmosféricas propicias se condensa transformándose en gotas de agua. (Fig. 3.1)



Cuando las gotas adquieren una dimensión y peso considerable caen sobre la superficie de la tierra en forma de lluvia. En su caída se encuentran con corrientes de aire ascendentes que provocan rompimiento de las gotas formándose gotas más pequeñas, éstas gotas encuentran corrientes ascendentes volviéndose a fraccionar en tamaños menores, formándose de ésta manera las cargas eléctricas de las nubes que se originan precisamente al ocurrir rompimiento de las gotas de agua desprendiéndose iones negativos que se dispersan en la atmósfera y al mismo tiempo son transportados por las corrientes de aire hacia la parte superior de la tormenta, es decir, a la parte inferior de la nube, en tanto la parte superior de la nube se carga en forma inductiva.

Las nuevas gotas establecidas quedan cargadas positivamente continuando su descenso hacia la parte inferior de la tormenta que es la tierra.

TEORIA DE ELSTER Y GEITEL:

Se fundamenta en estudios sobre una gota grande de lluvia a través de su campo eléctrico cuyo gradiente en la superficie es de 100 V/m, debido a la acción de éste campo,

la gota se polariza en la parte superior por una carga negativa y en el inferior por una positiva. La gota cargada en su caída se encuentra con corrientes ascendentes que le producen una reducción de tamaño y la gota de tamaño reducido continúa su caída hacia la tierra, pudiéndose encontrar con otra gota de tamaño mayor haciendo contacto, con lo que la primer gota aumenta en carga positiva en la parte inferior y la segunda gota sufre el mismo aumento de carga pero negativa y en la parte superior.

Por lo tanto la nube se carga positivamente en la parte inferior. El contacto entre las gotas de diferente tamaño se repetirá frecuentemente originándose un intercambio de signo de carga en las gotas, las nubes aumentan de ésta manera su carga hasta llegar a un valor crítico que produce la descarga con trueno.

TEORIA DE WILSON:

Wilson hizo un nuevo desarrollo científico respecto a la electrificación de las nubes, su teoría está basada en que las gotas de lluvia al caer adquieren carga producida por iones que se encuentran presentes en las corrientes de aire ascendentes.

En la atmósfera normalmente existe una gran cantidad de pequeños iones negativos y positivos que se mueven en diversas direcciones con una velocidad de un centímetro por segundo bajo la acción de un campo eléctrico de 1 V/m. La existencia de iones en el aire se estima en el orden de 1000 positivos y 800 negativos por cm^3 . La gama de iones aumenta y al mismo tiempo las nubes se cargan eléctricamente por el efecto de la ionización. Los iones negativos viajan hacia la parte inferior de la nube cargándola negativamente y los iones positivos se dirigen hacia la tierra para cargarla positivamente.

La teoría de Wilson especifica que para estudiar el origen de las descargas eléctricas en las nubes es necesario considerar el rompimiento de las gotas de una tormenta, y por consiguiente la separación de su carga eléctrica respectiva debido a la acción de la gravedad y a las corrientes de aire ascendentes.

En el proceso de la lluvia las gotas hacen contacto con los iones presentes en el aire, dando origen a que aumente la ionización de la atmósfera que facilita la formación de la trayectoria del canal del rayo para descargar hacia tierra ó hacia nube.

TEORIA DE LOS CRISTALES DE HIELO:

Esta teoría trata de explicar la importancia que representan los cristales de hielo, comúnmente conocidos como granizos, especialmente en las partes superiores de las nubes y también en las regiones antárticas; así, se trata de dar algunas explicaciones a éste fenómeno.

Simpson y Robinson describen la formación de cargas eléctricas al chocar un granizo con otro, permitiéndole así que el aire adquiera carga positiva y el hielo quede cargado negativamente.

Elster y Greitel opinan que la separación de cargas eléctricas se debe a la fricción entre vapor de agua con granizos ó con gotas de agua.

Así se trata de explicar que en las tormentas recién formadas con un gran cúmulo de nubes y en las que no existen precipitaciones pluviales con temperaturas de -10°C ocurran descargas eléctricas en el interior de la nube.

3.2 EFECTOS DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS.

Los fenómenos de sobrevoltaje más frecuente en instalaciones son originados por fenómenos externos como son las descargas atmosféricas. Este tipo de situación ocasiona salidas frecuentes en las instalaciones que provocan interrupciones en el servicio, por lo que es importante conocer los efectos de las descargas atmosféricas.

Basta con que se tengan nubes sobre la línea de transmisión para que se presente la posibilidad de un sobrevoltaje. Las nubes en un medio seco y con viento a una velocidad aproximada de 40 Km/h originan sobrevoltajes en la instalación.

En general los sobrevoltajes de tipo externo pueden ser de tres tipos:

POR CARGA ESTATICA.

Estos sobrevoltajes se presentan en las instalaciones y en particular en las líneas de transmisión por el simple hecho de que existen nubes sobre éstas, y que las nubes sean desplazadas por el viento; éste caso es el menos peli-

grasa ya que se disminuye considerablemente su efecto mediante el uso de hilos de guarda en la línea de transmisión.

POR DESCARGA INDIRECTA.

Se presentan sobrevoltajes por descargas indirectas por la presencia de rayos que caen en puntos cercanos y que por efecto de inducción electrostática y electromagnética introducen transitorios en las líneas. Este tipo de sobrevoltajes es el más frecuente y puede ser grave dependiendo de la intensidad de la descarga, ya que de mediciones realizadas en el campo se sabe que los sobrevoltajes son del orden de 100 y hasta 200 kv con corrientes de 25 a 75 kAmp.

POR DESCARGA DIRECTA.

Este tipo de sobrevoltajes son los menos frecuentes pero los que pueden causar los daños más graves, debido a la enorme cantidad de energía que trae consigo una descarga atmosférica, las corrientes que se presentan por este tipo de descarga pueden alcanzar valores hasta de 100 KA instantáneos, pero que producen esfuerzos dinámicos y térmicos en las instalaciones.

Por lo general una descarga directa sobre una línea de transmisión provoca una onda de sobrevoltaje inicial que se divide en dos ondas viajeras que van hacia la izquierda y hacia la derecha del punto en que se produce la descarga con una velocidad igual a la de la luz en el caso de conductores aéreos, además el rayo tiende a formar un arco a través de los aisladores. No obstante que la velocidad de propagación es igual a la de la luz, las ondas se atenúan rápidamente y sus efectos destructivos quedan, por lo común, confinados a la región en que cayó el rayo.

3.3 SOBREVOLTAJES DE TIPO EXTERNO.

Sobrevoltaje es una alteración del potencial de un sistema, ó parte de él, con tendencia a sobrepasar ampliamente su valor normal. Un sobrevoltaje es lo contrario a una variación porque ésta significa una disminución, mientras que sobrevoltaje significa un aumento; pero se parecen en que ambas son momentáneas y obedecen a causas ajenas al circuito y de difícil ó imposible previsión.

Los sobrevoltajes de origen externo son llamados así porque se originan por causas externas al circuito y se originan por:

a) ABSORCIÓN DE CARGAS FLOTANTES EN LA ATMÓSFERA:

Esta clase se distingue por crecimiento lento del potencial y larga duración. Si el sistema está conectado a tierra la carga absorbida puede fluir fácilmente, sin que el potencial se altere en forma sensible; pero si el sistema está aislado, la carga no puede escapar y su potencial más crece más y más, hasta que se produce una descarga en algún punto, seguida de un arco.

b) INFLUENCIA DE NUBES CARGADAS:

Cuando una nube positiva se acerca a la línea, los electrones que le faltan a la nube afluyen de todas partes de la línea y tratan de pasarse a la nube. Si el sistema está aislado, sus propios electrones se moverán hacia el lugar más cercano a la nube, y la línea tendrá carga negativa en ese lugar, y positiva en sitios abandonados por los electrones. El potencial de la línea será positivo respecto a tierra, e irá creciendo conforme la nube se acerca, pudiendo llegar a causar una descarga en algún punto débil. Cuando la nube se aleja, las cargas regresan a su origen y las condiciones normales quedan restablecidas.

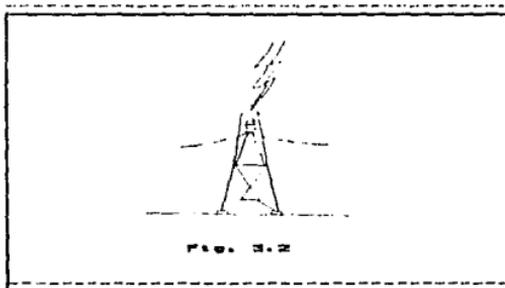
c) RAYOS INDIRECTOS:

Supongamos que la nube, antes de irse, descarga sobre un árbol u objeto separado de la línea. En ese momento desaparece el campo de la nube, y la carga negativa de los conductores queda en libertad; pero no es fácil que un alud de electrones sueltos pase a tierra venciendo la resistencia de los conductores y la inductancia general que se opone al establecimiento instantáneo de una corriente de intensidad elevada, aunque la salida a tierra se halle muy cerca. Entonces es posible y probable que los electrones busquen el primer aislador que se les presenta como una invitación a saltar, y descarguen a tierra en torno suyo, formando un arco de fase a tierra.

Para esta clase de sobretensiones es prácticamente lo mismo que el sistema esté conectado a tierra, ó que esté completamente aislado; la protección debe ser local, en cada torre, en cada aislador, para que la descarga sea hecha en forma tal que no cause daños graves y su duración sea corta.

d) RAYOS DIRECTOS ENTRE NUBE Y LINEA:

En este caso la sobretensión llega al valor más alto y se forman arcos de fase a tierra en todos los conductores, que en muchos casos se convierten en arcos de fase a fase. Las cargas supuestas positivas, caídas de la nube, exceden en mucho a las negativas que existían un momento antes en los conductores, y se establece una corriente transitoria de gran intensidad entre éstos y tierra para dar salida al exceso de carga positiva; ó mejor dicho, se forma una poderosa corriente de electrones de tierra hacia la nube, a través de los arcos de los conductores. (Fig. 3.2)



Es casi imposible evitar que un rayo directo produzca arcos a tierra en todos, ó parte de los conductores de transmisión. De manera que, si no destruye los aisladores, corta los cables y funde parte de una torre, ó hace astillas los postes; el rayo directo causa interrupción en el circuito por la sobrecorriente que se establece a través de dos ó más arcos a tierra. Si el sistema está conectado a tierra originalmente, basta un sólo arco para hacer salir la línea del sistema.

3.4 SOBREVOLTAJES DE ORIGEN INTERNO.

Son sobrevoltajes que se presentan en las instalaciones por operaciones, fallas u otros motivos propios de la red.

Entre éstos se tienen:

a) SOBREVOLTAJES POR INTERRUPCION BRUSCA O DISMINUCION DE CARGA:

Consisten en la propagación a lo largo de la línea, hasta el generador, de la supresión ó reducción de corriente bajo la acción de una onda negativa que avanza con velocidad cercana a la de la luz, acompañada de otra onda positiva de potencial, que se suma al potencial existente y produce sobretensión. El fenómeno se conocía como "extra-ruptura". Es una sobretensión de poca importancia debido a que la corriente alterna se corta cuando la onda pasa por cero.

b) SOBREVOLTAJES POR CONEXION O AUMENTO DE CARGA:

Consisten en la propagación a lo largo de la línea, de incrementos de corriente en forma de una onda positiva de intensidad acompañada de otra onda negativa de potencial y que se dirigen al generador; en tanto avanzan hacia la carga ondas positivas de potencial e intensidad de magnitud igual a las anteriores. Aunque unas y otras no son por sí mismas peligrosas, están en condiciones de ser reflejadas, cambiar de signo y de combinarse entre sí, produciendo en instantes una sobretensión.

c) SOBREVOLTAJES POR EFECTO FERRANTI EN LAS LINEAS DE TRANSMISION:

El efecto Ferranti implica una condición resonante en un circuito serie de corriente alterna que contenga capacitancia e inductancia. En sistemas trifásicos en los

que se encuentran instalados transformadores se ha observado la elevación de la tensión inmediatamente después de la operación de un fusible, de la operación de cierre ó apertura no simultánea de los contactos de los interruptores, ó por rotura del conductor de una línea.

La resonancia eléctrica en el circuito de corriente alterna, se debe a la apertura de un desconectador unipolar de línea ó un transformador, y es producida por la combinación en serie de elementos inductivos y capacitivos, y mantenida a la frecuencia del sistema. El remedio indicado es el empleo de desconectadores tripolares, y la sustitución de fusibles por interruptores.

d) SOBREVOLTAJE POR ARCOS A TIERRA:

Los arcos a tierra pueden producir sobrevoltajes al generar oscilaciones de alta frecuencia. Los arcos se forman entre uno de los conductores de la línea de transmisión, aislada ó incompletamente puesta a tierra, y un objeto cercano, que puede ser una rama de árbol, un ave posada en la cruceta, una persona que ha subido a la torre, etc. La intensidad de la corriente a tierra puede ser alta, calculándose aproximadamente a razón de 3 miliamperes por cada kilómetro y por cada kilovolt entre fases para líneas aéreas.

Los conductores en los cuales no aparece el arco forman con su inductancia y capacitancia un circuito oscilante y el arco se convierte en un generador de oscilaciones de alta frecuencia, y cada vez que se apaga por el viento ó cualquier otra causa, aparecen sobretensiones únicamente bruscas e intensas que atacan a los aisladores.

Para impedir la formación de arcos en la línea de transmisión se emplean bobinas de extinción ó disonancia que se conectan entre el neutro del transformador y tierra. Las bobinas de extinción se construyen como un transformador monofásico, con núcleo, tanque de aceite, boquilla de conexión, derivaciones de ajuste, etc. Trabaja en tales condiciones que no puede entrar en resonancia con la línea. Su papel consiste en recoger la corriente de capacitancia de dos fases que han pasado a tierra, y entregar esa corriente al neutro del transformador.

También se emplea la conexión directa del neutro a tierra que suprime el arco desconectando momentáneamente la línea, tantas veces como se inicie un arco.

e) SOBREVOLTAJES POR OPERACIONES DE MANIOBRA:

Son sobrevoltajes de alta frecuencia donde la tensión toma la forma de una senoide amortiguada con una frecuencia del orden de 20 KHz. Se producen por la apertura ó cierre de interruptores en el sistema. Cuando los contactos del interruptor abren, la extinción final de la corriente viene seguida por la aparición de una tensión entre los contactos. La tensión presenta una amplitud que puede alcanzar hasta dos veces la tensión del sistema y frecuencia relativamente alta. La tensión fluye al circuito en las terminales del interruptor y viaja a través de la línea en ambas direcciones con la posibilidad de doblar su valor si se tienen circuitos abiertos.

En la práctica la resistencia y el efecto corona reducen rápidamente la magnitud de las ondas viajeras en las líneas. Para la disminución del problema la desconexión de los interruptores es a base de la separación de contactos en un medio de una determinada constante dieléctrica, ya que no se ha diseñado otra forma de desconexión. Esta forma de desconexión puede provocar que el arco eléctrico entre contactos fijo y móvil que han quedado separados se vuelva a restablecer cuando por la magnitud de la falla, la rigidez dieléctrica del medio de extinción (aceite, aire, hexafluoruro de azufre) baja debido a la ionización. Este arco eléctrico somete a los contactos a un voltaje adicional llamado voltaje de restablecimiento ó voltaje de recuperación que puede alcanzar valores elevados y que someten a la instalación a esfuerzos dieléctricos graves,

sin embargo, se puede considerar que está implícito en la operación de los interruptores aún cuando no se interrumpa por fallas graves.

3.5 PROTECCION CONTRA SOBREVOLTAJES.

La protección contra sobrevoltajes se puede dividir en tres grupos:

a) La protección que previene la ocurrencia de una onda ó reduce su magnitud. Incluye el trazo prudente de la ruta, evitando el paso por lugares demasiado altos, boscosos ó profundos, porque en ellos las descargas son más frecuentes y violentas; también por la distinta distribución del potencial en el medio ambiente respecto a la altura de la línea, la cuál se carga más en las cimas que en los valles.

También incluye la eliminación de maniobras innecesarias en las estaciones y adopción de procedimientos modernos para disparar interruptores solamente cuando la apertura sea indispensable.

Este tipo de protección incluye el uso de cables de guarda, los cuáles se describirán más adelante.

b) La protección con dispositivos que desvían la onda de línea a tierra (cuernos de arco).

c) La protección con dispositivos que modifican la forma de onda de sobretensión y/o absorben parte de su energía (pararrayos).

CABLES DE GUARDA:

El cable de guarda es un conductor desnudo, de 9.5 a 19 mm de diámetro, ordinariamente fabricado con alambres de acero galvanizado, cobre duro, ACSR, copperweld, bronce fosforado, etc., se conectan a los puntos más altos de la torre de la línea sobre los conductores activos ó fases de la línea, es decir, son hilos soportados paralelamente a los conductores de la línea, con una colocación a un nivel superior de ellos que sirve como pantalla protectora impidiendo que los rayos caigan directamente sobre los conductores activos. Además, en la parte alta de las torres se conectan a los hilos de guarda un cable de tierra que sirve para derivar a tierra las ondas de sobretensión producidas por la descarga y que viajan por los hilos de protección.

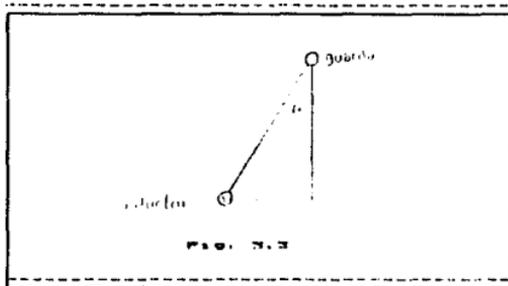
Los cables de guarda disminuyen la carga inducida por la nube en la línea, al ofrecer inmediatamente cargas traídas del suelo en cantidad ilimitada para satisfacer las necesidades del campo de la nube.

El nivel de protección de un sistema eléctrico de potencia contra las descargas atmosféricas cuando se esta-

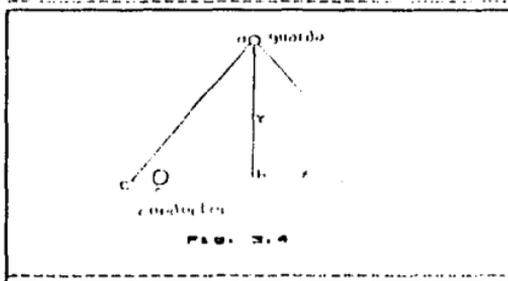
blecen hilos de guarda cobra gran interés para el servicio que preste. Cuando el hilo de guarda recibe el impacto del rayo se propagan a través de él en cada sentido ondas de sobrevoltaje que inducen en los conductores de fase ondas de menor amplitud cuyo valor depende del factor de acoplamiento que relaciona las distancias entre los hilos de guarda y los conductores de fase, éste factor se ve afectado por el efecto corona que se produce en los conductores.

Se debe evitar que la descarga ó el arco salte de los hilos de guarda a los conductores de fase, por lo que en general se adopta una distancia entre conductores de fase e hilos de guarda, una altura de por lo menos la distancia entre conductores de fase.

Para obtener una mejor precisión en la colocación de los hilos de guarda se debe determinar el ángulo ó relación de protección de acuerdo como se indica a continuación: (Fig. 3.3)



el ángulo de protección está comprendido entre los trazos de la línea que parte verticalmente del hilo de guarda hacia abajo y del hilo de guarda al conductor que se desea proteger. El ángulo es normalmente de 30° , pero el espacio protegido por cada hilo dentro del cual no es de esperar que penetre ningún rayo directo se define por un cono de ángulo de valor 2α , es decir, 60° : (Fig. 3.4)



De la figura: $W = D + 4H$

donde D es la distancia entre los dos cables de guarda y H es la altura promedio del cable de guarda. Si sólo hay un cable de guarda, la distancia D es cero. La altura promedio del cable de guarda puede ser encontrada con la relación:

$$H = H_T - (2/3)(H_T - H_M)$$

donde H_T es la altura de remate del cable de guarda en la torre y H_M es la altura con respecto a tierra del cable de guarda en su punto medio.

Una fórmula mejorada es sugerida por Whitehead:

$$W = D + 4H^{1.07} \quad (\text{metros})$$

En la figura 3.5 θ es el ángulo que muestra la zona protegida por el cable de guarda (usualmente su valor es de 63.5°) y α es el ángulo de blindaje (á de guarda) entre el cable de guarda y el conductor de fase, W es el ancho de la superficie debajo de la línea protegida por el cable de guarda y A,B,C son los conductores de fase.

Pruebas de laboratorio coordinadas con resultados de campo obtenidos de líneas existentes indican que un buen promedio del ángulo de blindaje es 30° . Se ha llegado a esta conclusión usando modelos construidos en laboratorios

con diferentes escalas y diferente localización del cable de guarda y del electrodo que simula la descarga, se ha llegado a la conclusión que 45° resulta satisfactorio cuando la línea se encuentra en un mismo nivel (sin accidentes en el terreno).

CUERNOS DE ARQUEO:

Los cuernos de arqueo están formados por dos antenas conductoras, montadas sobre un aislador cada una, de manera que la mínima separación corresponde a la parte más baja de las antenas. Una de ellas se conecta directamente a la línea que se protege y la otra a tierra, a través de una resistencia que limita la corriente de descarga. Su separación es tal que no pueda producirse un arco en ellas a la tensión de trabajo. (Fig. 3.6)

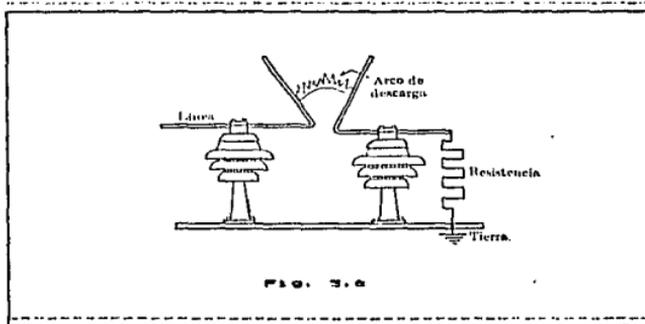


FIG. 3.6

Cuando una sobretensión alcanza del 150 al 200% de la tensión normal se produce la descarga a través del aire y se deriva a tierra. La función de las antenas es romper el arco formado, que tiende a extenderse hacia la parte alta de las antenas porque calienta el aire y la corriente tiende a formar un arco tan grande como le es posible.

Los cuernos de arqueo, si se emplean únicamente como protección contra los rayos, están lejos de ser perfectos, porque suelen producirse arcos sin necesidad, ya que su protección no es bien adecuada debido a la relativamente reducida velocidad de descarga de la resistencia, y porque no suprimen siempre el arco dinámico que sirve a la descarga transitoria, lo que da origen a arcos permanentes de descarga a tierra ó a la destrucción del apartarrayos (se considera que los cuernos de arqueo juegan el papel de apartarrayos). Por las razones anteriores, los cuernos de arqueo se han abandonado como medio de protección de líneas.

APARTARRAYOS:

El apartarrayos es un dispositivo que protege los transformadores u otros aparatos eléctricos contra los impulsos de sobretensión debidos a descargas atmosféricas.

El apartarrayos provee un trayecto por el cual la sobrecarga transitoria se deriva a tierra antes de que pueda atacar & dañar severamente al transformador & a otros componentes.

Los apartarrayos descargan a tierra las cargas eléctricas asociadas a los sobrevoltajes producidos en los conductores por descargas atmosféricas y, en apartarrayos de diseño moderno, por la operación de interruptores, eliminando así los sobrevoltajes y evitando que dañen el aislamiento del equipo y las instalaciones eléctricas.

El apartarrayos se conecta entre fase y tierra con el circuito eléctrico al cual protege y en condiciones normales debe comportarse como un aislador. Al aplicarle un sobrevoltaje el apartarrayos debe convertirse en conductor y al desaparecer el sobrevoltaje debe convertirse de nuevo en aislador, interrumpiendo la corriente que se ha establecido a través de él.

El apartarrayos elemental consiste en un intersticio de aire en serie con un elemento resistivo. La sobretensión produce una chispa que atraviesa el intersticio de aire y el elemento resistivo (carburo de silicio, por ejemplo), el cual suele ser un material que provee un camino de baja

resistencia al impulso de sobretensión, pero que ofrece una alta resistencia para la circulación de la energía presente en la línea, dicho material se conoce como elemento "valvular". Hay diversos tipos de apartarrayos, pero en general todos se basan en el mismo principio: existe un intersticio de aire en serie con un elemento resistivo (valvular) y cualquiera que sea el material con que este hecho, debe comportarse como un conductor para los impulsos de sobretensión y a la vez como un aislador con respecto a la energía de la línea. En otras palabras, el apartarrayos canaliza sólo los impulsos de sobretensión, pero la energía de la línea no tiene posibilidad de derivarse a tierra.

Las partes esenciales de los apartarrayos son:

- a) UN DETONADOR para evitar el paso incesante de corriente por el apartarrayo. Mientras el potencial de la línea no exceda de cierto límite, el aparato permanece inactivo; cuando el potencial sobrepasa ese límite el detonador conecta y la conexión se conserva hasta que la corriente sea cortada por el interruptor interior del apartarrayo, ó en su defecto, por el interruptor de la línea. El detonador puede estar formado por antenas, hemisferios, discos paralelos, etc, puede funcionar en aire ó en gas especial.
- b) UN RESISTOR que actúa como resistencia en paralelo con la línea y tierra, para reducir el potencial de las ondas. Puede ser metálico, de grafito y arcilla, de material cerámico, de material inalterable ó fusible; puede funcionar por conducción ó por ionización gaseosa; lo importante es que su resistencia tenga el valor apropiado en el momento oportuno, porque de él depende la protección que ofrece.

c) UN INTERRUPTOR cuyo objetivo es cortar la corriente que sigue pasando y evitar la destrucción del aparato por efecto Joule, porque el detonador no es capaz, por sí solo, de apagar el arco que se ha formado entre sus electrodos. El interruptor puede funcionar por soplo magnético de una bobina, por transformación química de materiales fusibles en cuerpos aislantes, por efecto valvular de espacios ionizados, etc.; puede ser un mecanismo de apertura automática y reconexión posterior, ó un fusible que se repone automáticamente; puede estar incorporado al detonador, ó al resistor, ó faltar en apariencia; pero siempre existe, porque la duración del apartarroyos en servicio depende de su eficacia.

El tipo de apartarroyos más usado en los sistemas de potencia es el tipo autovalvular, lo fabrica la Westinghouse Electric Corporation, desarrollado por el doctor Joseph Slepian. Existen dos tipos de apartarroyos autovalvulares; uno que consiste en discos de carbón separados por delgadas micas y uno denominado SV que ha sustituido al anterior y consiste en uno ó más bloques circulares porosos en serie, dependiendo el número de ellos de la capacidad que debe tener el apartarroyos. Los bloques son de material cerámico y partículas conductoras que se mezclan uniformemente a la pasta. Los bloques se someten a una fuerte presión y se cuecen en un horno, cuando están listos quedan en ellos cientos de poros, para tener contacto eléctrico las caras paralelas se revisten de cobre.

Su funcionamiento se basa en el hecho de que la tensión necesaria para iniciar y mantener una descarga a través de pasos angostos es mucho más elevada que cuando la descarga se hace libremente. Los pasos angostos se regulan de acuerdo a la tensión necesaria para iniciar y mantener la descarga.

Cada bloque tiene un espesor de una pulgada y dos pulgadas de diámetro. La tensión nominal para cada bloque es de 3 Kv eficaces. Los bloques se juntan y sujetan por medio de una cubierta de porcelana, lo que permite instalar el apartarrayos a la intemperie. (Fig. 3.7)



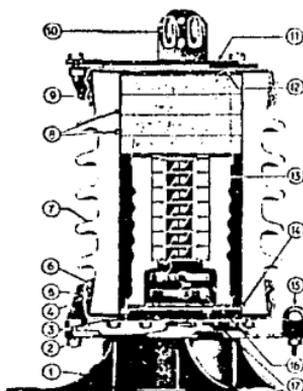
También existen otro tipo de apartarrayos, entre los que se encuentra el apartarrayos de Thyrita, pero debido a su costo no es práctico emplear gran número de ellos para proteger las líneas.

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

-79-

La thyrita es un material cerámico no poroso, fabricado por la General Electric Company, que es un excelente aislante hasta que se alcanza la tensión crítica para la cuál su resistencia decrece repentinamente permitiendo el paso de corrientes intensas con pequeño aumento de la tensión. La corriente aumenta 12.6 veces cuando la tensión se duplica. Cuando la tensión vuelve a su valor normal, el aparterrayos corta la descarga y evita que siga circulando la corriente. El material se prepara en discos con las superficies opuestas cubiertas de cobre para que haya contacto eléctrico. Cierta número de ruptores en serie con los discos de thyrita mantienen el circuito abierto hasta que se produce la descarga. (Fig. 3.8)

Los aparterrayos deben conectarse tan cerca como sea posible de los aparatos que se quieren proteger, actualmente suelen montarse directamente sobre los transformadores. Cuando el aparterrayos ha de proteger una subestación, debe instalarse en el extremo de la línea de entrada ó de salida, tan cerca como sea posible de los aparatos de la central. Suelen instalarse aparterrayos en el empalme de líneas aéreas con las de cable subterráneo, para impedir el acceso de la sobretensión.



1. Base de fundación de hierro fundido. 2. Tapon de respiración. 3. Filtro de gases. 4. Placa metálica. 5. Anillo metálico de ajuste inferior. 6. Elemento. 7. Envolvente de porcelana de proceso húmedo. 8. Discos de fibra. 9. Anillo metálico de ajuste superior. 10. Terminal doble de conexión con la línea. 11. Tapa. 12. Resorte de presión. 13. Elemento captador. 14. Junta de cuero. 15. Terminal doble para conexión a tierra. 16. Placa de soporte. 17. Placa de fondo.

Fig. 3. 3

PARARRAYOS

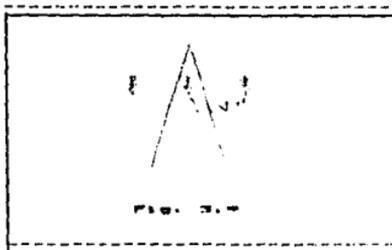
Los pararrayos son piezas de tubo de hierro galvanizado, con su extremo superior cortado en diagonal, terminado en punta, de una longitud variable que depende de la zona que va a proteger y con un diámetro que depende de la longitud

del tubo. Los pararrayos constituyen un medio adicional de protección contra las descargas atmosféricas directas, aunque no siempre son necesarios, si la red de cables de guarda está correctamente calculada. Estos actúan como electrodos, provocando mediante el efecto de puntas, la concentración de cargas electrostáticas durante la descarga de un rayo. Los pararrayos se colocan sobre las partes más altas de las estructuras.

3.6 SOBRECORRIENTES EN LAS LINEAS DE TRANSMISION AEREAS.

Existe sobrecorriente en una línea cuando la intensidad de la corriente que circula aumenta, tendiendo a exceder al valor normal. Las causas principales son:

1. Rayos directos ó indirectos durante una tempestad, ó sobretensiones en general, que originan arcos a tierra en los conductores.
2. Caída de un conductor extraño sobre la línea, al acercarse establece un arco de fase a fase. Es una causa muy común en campos sembrados de maíz, cuyas hojas secas son levantadas por el viento.
3. Contacto directo entre conductores de polaridad opuesta, debido a falla mecánica de algún soporte y acción del viento, lo que origina un arco de fase a fase.
(Fig.3.9)

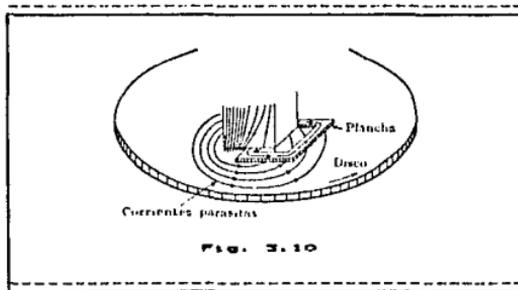


4. Disminución de la distancia entre conductores de alta tensión, más allá de la separación mínima, y producción de una descarga seguida de un arco.
5. Ruptura ó perforación de un aislador en forma tal que no pueda impedir el escape de corriente. Si el sistema está conectado a tierra, se presenta un arco de fase a tierra a través de la cruzeta, torre y cable de guarda

3.7 PROTECCION CONTRA SOBRECORRIENTES.

Las líneas de transmisión pueden protegerse contra las sobrecorrientes utilizando los relevadores de sobrecorriente, que son relevadores con un contacto fijo y otro móvil, montado en un disco giratorio. El tiempo de operación de los relevadores de sobrecorriente varía con la magnitud de la corriente. El par se produce en un disco de

inducción por la reacción de dos flujos fuera de fase que se cruzan en el disco y reaccionan con las corrientes circulantes (de Eddy) inducidas en el disco por los flujos. (Fig. 3.10)



Los relevadores de sobrecorriente requieren básicamente de dos ajustes: el primero es el ajuste de disparo ó acción, es la corriente necesaria para que el disco se mueva y cierre los contactos, se ajustan por medio de derivaciones (taps) de corriente; el segundo ajuste es el de tiempo, este ajuste varía el tiempo de operación para un tap dado y magnitud de corriente, se obtiene al mover la posición de los contactos cuando el relevador se restablece.

El contacto móvil gira en un plano horizontal y se encuentra montado sobre el eje del disco, el contacto y el

disco se restablecen por un resorte en espiral que sirve de conexión al contacto móvil.

Los relevadores de sobrecorriente cuando ya han operado muestran ésta acción con indicadores que saltan a la vista y están dispuestos para reponerse después de que se ha notado su indicación.

3.8 CORTOCIRCUITOS EN LAS LINEAS DE TRANSMISION.

Durante la operación de los sistemas eléctricos de potencia el cortocircuito es una condición indeseable pero en cierto modo inevitable, ya que por más confiable que se haya diseñado un sistema existen muchas causas ajenas al diseño de los mismos, que plantean la probabilidad de ocurrencia de una falla por cortocircuito.

En forma simple se produce un cortocircuito cuando existe contacto entre dos ó más conductores de distinta fase ó entre un conductor de fase y tierra, los cortocircuitos normalmente aumentan en forma considerable la magnitud de la corriente que circula por el circuito. En general la intensidad de la corriente que define una falla como cortocircuito es de por lo menos dos veces el valor de la corriente nominal.

El fenómeno del cortocircuito representa la condición más severa a la que se puede ver sometida una instalación eléctrica, ya que en su manifestación más acentuada produce esfuerzos térmicos y dinámicos.

ESFUERZOS TERMICOS:

Una protección bien realizada elimina un cortocircuito de la red en algunas décimas de segundo, en cambio, si esto no ocurre, las consecuencias térmicas de las corrientes de cortocircuito sobre las instalaciones aún cuando en la primera etapa del fenómeno no tiene mucha importancia, cuando la energía térmica acumulada se difunde a todas las partes no metálicas puede provocar problemas severos.

Se puede presentar el caso de que con corrientes de cortocircuito muy elevadas, se pueden alcanzar también temperaturas elevadas en unos cuantos segundos, cuando los medios refrigerantes y los aislamientos no tienen el tiempo suficiente para absorber la sobretemperatura que se presenta de improviso. Los puntos más delicados y fáciles de ceder son en éste caso las partes metálicas mecánicamente más frágiles, donde el considerable efecto térmico se suma a las solicitudes dinámicas producidas por las corrientes de cortocircuito.

ESFUERZOS DINAMICOS:

Los efectos dinámicos de las corrientes de cortocircuito son de doble naturaleza porque están relacionados con la dilatación térmica de los materiales y por las fuerzas de atracción y repulsión que se manifiestan durante la perturbación

Los esfuerzos dinámicos provocan esfuerzos de naturaleza mecánica en las parte rígidas de las instalaciones.

Estadísticas realizadas en relación a las fallas en sistemas eléctricos de potencia revelan que las líneas de transmisión aéreas representan el 50% del total de las fallas en el sistema. Las fallas tienen su origen en diferentes causas que van desde las descargas atmosféricas hasta las fallas propias del sistema manifestadas en su mayoría por cortocircuito.

En las líneas de transmisión aéreas el cortocircuito puede ser:

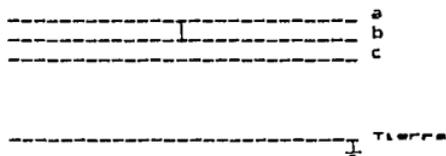
1. De una fase a tierra.
2. Entre dos fases.
3. Entre dos fases y tierra.
4. Trifásico.

De estudios realizados, la distribución de ocurrencia de fallos de cortocircuito tiene la forma aproximada siguiente:

1. Falta de fase a tierra, con una probabilidad de ocurrencia del orden de 85%.



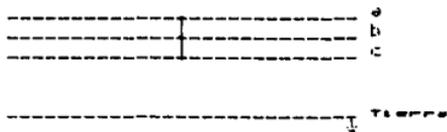
2. Falta entre dos fases, con una probabilidad de ocurrencia del orden de 8%.



3. Falta entre dos fases y tierra, con una probabilidad de ocurrencia del orden de 5%.



4. Falla trifásica, con una probabilidad de ocurrencia del orden de 2% ó menor, ya que su principal origen son los errores humanos.



Estadísticamente se observa que el tipo de falla más común en las líneas aéreas es el denominado de fase a tierra, cuyo origen puede encontrarse en una serie de fenómenos distintos, como son:

- a) Las sobretensiones de origen atmosférico que producen fallas de aislamiento en el aire.
- b) Las sobretensiones debidas a maniobras de interruptores y cuyo efecto es semejante al producido por las sobretensiones de origen atmosférico.
- c) Las sobretensiones producidas por inducción en líneas de transmisión paralelas, que aún cuando normalmente no son severas, en un momento dado bajo ciertas condiciones ambientales y de operación de la red pueden producir esfuerzos dieléctricos considerables.
- d) Fallas de aisladores por envejecimiento, salinidad, depósitos químicos de distinta naturaleza, etc.
- e) Ruptura y contacto a tierra de los conductores debido a corrosión atmosférica, viento, etc.

- f) Causas accidentales como conductores en la proximidad de zonas arboladas, ruptura ó contacto con elementos mecánicos operados por el hombre, etc.

Cuando se realiza un proyecto de líneas de transmisión, al realizar un análisis de cortocircuito es necesario considerar a todo el sistema y no únicamente a la línea, ya que la determinación de la corriente total de falla en un punto se obtiene como la contribución de las corrientes de cortocircuito por los elementos activos ó fuentes suministradoras de las corrientes de cortocircuito de la red bajo análisis en ese punto. Además es necesario considerar los estudios en por unidad y el de las componentes simétricas, cuyo análisis queda fuera del presente trabajo.

3.9 PROTECCION CONTRA CORTOCIRCUITOS.

Generalmente los cortocircuitos producen corrientes excesivamente altas en donde la protección por relevadores debe coordinarse con otros elementos para interrumpir el circuito. Dichos elementos se conocen como cortocircuitos y no son otra cosa más que interruptores para alta tensión ó disyuntores.

Los relevadores de protección y los sistemas de relevadores detectan condiciones anormales en el circuito eléctrico, y en forma automática funcionan los interruptores para aislar con mayor rapidez la falla. Esto limita el daño donde se localiza la falla e impide que sus efectos se propaguen al sistema. La función de los relevadores de protección acoplados a los interruptores es la de prevenir las consecuencias de las fallas. El interruptor debe poder interrumpir tanto las corrientes normales como las corrientes de falla.

Los disyuntores no sólo deben interrumpir, también deben cerrar el circuito. Esto puede ocasionar ciertos problemas, particularmente si el disyuntor cierra sobre un cortocircuito. En éste caso, el voltaje de interrupción que puentes al entrehierro de los contactos antes de que se toquen, produce un arco de alta corriente que funde los contactos antes de su cierre. Esta situación no es conveniente debido a que el disyuntor debe poder abrir los contactos nuevamente. A menudo se requiere el restablecimiento automático porque por lo general, las fallas son de naturaleza temporal. Cerca del 20% de los cortocircuitos persiste; sin embargo, después del restablecimiento, el disyuntor tiene que interrumpir de

nuevo la corriente de cortocircuito que se acaba de establecer.

Como es sabido, al interrumpir un circuito energizado se forma un arco entre los contactos, el cual en instalaciones de alta tensión puede provocar la destrucción de los mismos. Existen varios medios para suprimir el arco eléctrico cuando se acciona un disyuntor, entre ellos se encuentra el soplado y el aceite.

En los disyuntores de soplado cuando los contactos empiezan a separarse, se dirige una intensa corriente de aire contra el arco y transversalmente. Los gases ionizados del aire no solamente pierden en parte su ionización por la acción del aire, sino que el arco se alarga aumentando con ello su posibilidad de ruptura.

Para interrumpir circuitos de alta tensión cuando intervienen potencias elevadas se sumergen en aceite los contactos del interruptor para suprimir el arco que se produce.

El proceso de interrupción del arco en los disyuntores de aceite es el que sigue: cuando los contactos empiezan a

separarse, la corriente queda interrumpida al pasar por uno de sus valores nulos, y en éste instante la energía del campo magnético expresada como $Li^2/2$ es también nula. Como los contactos sólo se separan muy poco durante el tiempo en que la corriente tiene los valores próximos a cero, ésta continúa circulando mientras los contactos se separan, formándose así el arco que consiste en gases altamente ionizados. La tensión entre los contactos alcanza su valor máximo, por lo general, durante un tiempo muy pequeño antes ó después de que la corriente se anule, y ésta tensión tiende a mantener la corriente del arco. No obstante, el calor del arco descompone el aceite produciéndose gases que, en su mayor parte, no se ionizan. Estos gases, al combinarse de nuevo, tienden a des-ionizar los del arco, convirtiéndolos de éste modo en un dieléctrico suficiente para resistir la tensión entre los contactos, que tiende a mantener el arco. La corriente puede restablecerse varios periodos antes de que desaparezca la ionización del arco y se interrumpa la corriente. Al final, el aceite no carbonizado del tanque del disyuntor se introduce entre los contactos creando una rigidez dieléctrica suficiente para extinguir el arco. Los disyuntores de aceite modernos abren el circuito entre 3 y 8 periodos después del primer instante del cortocircuito.

A continuación se muestra una sección del disyuntor Allis-Chalmers B20-60, de 115 Kv, 800 Amp y 1500000 KVA de capacidad de interrupción. (Fig. 3.11)

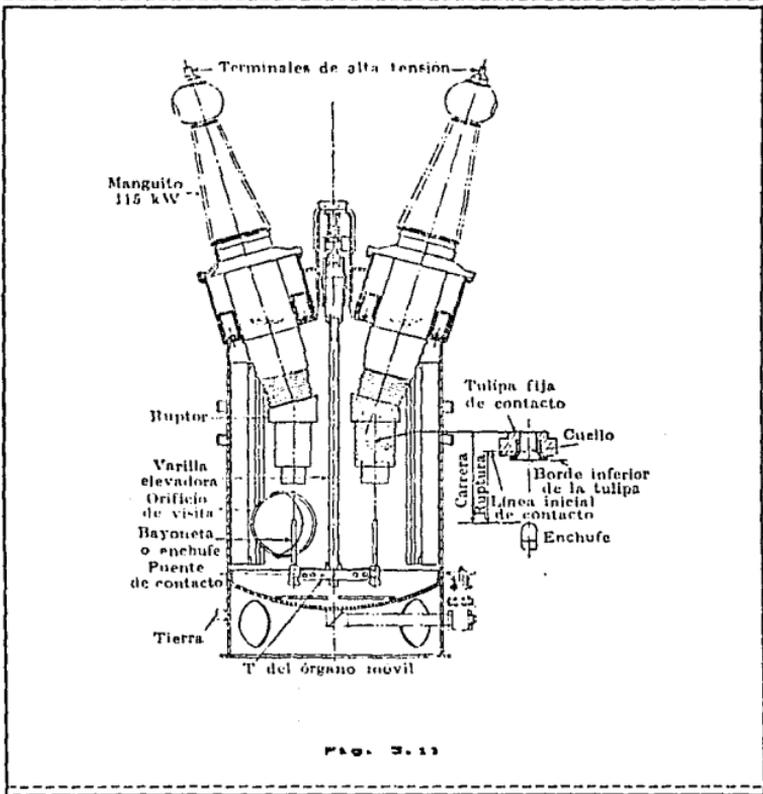


FIG. 3.11

En la figura, las terminales de alta tensión están empalmadas a los contactos fijos del disyuntor, dentro del depósito de aceite, por medio de varillas de cobre, aisladas de la caja por medio de boquillas aislantes para altas tensiones. Los contactos están rodeados por un ruptor ó tulipa estacionaria de contacto, que está representada en detalle. Los contactos móviles, ó puente, se accionan con la varilla elevadora, de madera bakelizada, que se prolonga hasta lo alto de la caja para unirse con los mecanismos de apertura y cierre. Al cerrar el circuito, las bayonetas ó enchufes suben hasta penetrar en el cuello de la tulipa de contacto del ruptor. Entre las tulipas de contacto y los contactos fijos hay una pequeña cámara de aceite. Durante el movimiento inicial de la bayoneta dentro de la cámara, al abrirse el circuito, se eleva la presión dentro de la misma por el calentamiento debido al arco, y el aceite es impelido hacia el paso libre, mezclándose con el arco y completando la cubierta dieléctrica de aceite, con lo que el arco se extingue.

Los disyuntores de soplado, en los que la extinción del arco se encomienda a un chorro rápido de aire dirigido sobre él, se suelen emplear para circuitos de hasta 15 Kv y 1500000 KVA, como no tienen aceite, no presentan el peligro de fuego por la inflamación del mismo.

CAPITULO 4.
AISLADORES Y
PUESTA A TIERRA
DE LAS TORRES

CAPITULO 4.

AISLADORES Y PUESTA A TIERRA DE LAS TORRES.

4.1 AISLANTES SOLIDOS CERAMICOS.

Los aislantes sólidos desempeñan un papel muy importante en las instalaciones eléctricas de transmisión y distribución. La vida de una máquina eléctrica depende fundamentalmente de la vida de sus aislamientos.

Inicialmente se designó como cerámicos a los materiales que contienen arcilla, actualmente se ha extendido el significado a otras sustancias inorgánicas cuyos constituyentes requieren de un proceso semejante al proceso para obtener arcilla. Los materiales inorgánicos como la arcilla son utilizables en variadas proporciones.

El producto cerámico más noble, compacto y blanco de todos es la porcelana, cuando se emplea una pieza de poco espesor es translúcida. La porcelana está compuesta por un agregado de caolín (silicato de aluminio puro) y feldespato (silicato de aluminio-potasio). La porcelana dura contiene generalmente de un 40 a 60% de caolín, 20 a 30% de cuarzo y

20 a 30% de feldespato. La porcelana para usos eléctricos lleva una parte considerable de arcilla, en sustitución del caolín & feldespato.

La preparación de la porcelana se efectúa mezclando y amasando materiales básicos finamente molidos y eliminando después el agua con filtros de prensa. Los objetos se moldean y se someten a secado lento por aire caliente y rápido al vapor durante 24 horas, dejándolo enfriar por un periodo de tiempo semejante.

La porcelana dura se emplea en aisladores de alta y baja tensión para baja y altas frecuencias, condensadores, piezas aislantes, tubos de protección para aislamientos térmicos y en bujías de encendido.

VIDRIO:

Los vidrios son cuerpos sólidos transparentes de consistencia frágil compuestos por óxido metálico de sodio y calcio y anhídrido sílico.

El vidrio de cuarzo es la designación que se le ha dado al anhídrido sílico puro que es un producto de aspecto le-

choso a base de arena de cuarzo conteniendo aproximadamente el 99.7% de anhídrido silico.

Se aplica en aisladores para electrofiltros, componentes de rectificadores, tubos de descarga y aparatos de alta frecuencia.

OXICERAMICAS:

Una evolución de las porcelanas son las masas con alto contenido de óxido de aluminio (Al_2O_3) que reciben el nombre de ultraporcelanas, tienen la particularidad de presentar mayor resistencia al fuego y una mejor conductividad térmica; se emplean básicamente para la fabricación de bujías de encendido y como tubos aislantes para protección de elementos térmicos.

4.2 PERDIDAS EN AISLANTES SOLIDOS.

La mayoría de los aislantes sólidos cuando se encuentran bajo la acción de un campo eléctrico variable, permiten el paso de una corriente pequeña, ya que se comportan en parte como conductores; esto ocasiona pérdidas que se manifiestan en forma de calor.

La energía que se disipa de ésta forma se debe a las pérdidas dieléctricas que son básicamente de tres tipos:

1) Pérdidas por conducción:

Aparecen en los aislantes por efecto de translación de cargas eléctricas que pueden ser electrones ó iones. La conducción eléctrica se debe al movimiento de los electrones libres (en cantidades pequeñas) que existen en todos los materiales aislantes.

La conducción iónica aparece en los materiales capaces de producir iones, que tienen una movilidad que depende en gran parte de la temperatura, la translación de los mismos origina una corriente eléctrica que engendra calor y pequeñas pérdidas de energía.

2) Pérdidas de polarización:

Se deben al movimiento de dipolos que tienden a orientarse por la acción de un campo eléctrico. En éstas pérdidas la frecuencia es muy importante, ya que para corriente continua ó frecuencias muy bajas no hay pérdidas considerables al igual que con frecuencias muy elevadas, pero existe un rango de frecuencias en el que las pérdidas son considerables. Las pérdidas por polarización se ven afectadas también por la constante dieléctrica del material).

3) Pérdidas por histéresis dieléctricas:

En los aislantes sólidos se presenta un fenómeno de histéresis dieléctrica semejante a la histéresis magnética de los materiales magnéticos. Esto origina una distribución con variaciones y caída de tensión de sentido contrario al campo aplicado, lo que origina diferencias de potencial muy fuertes.

En algunos aislantes de constitución heterogénea aparecen regiones limitadas de gran conductividad, produciéndose un aumento considerable de pérdidas. En los canales de pérdidas éstas aumentan con la temperatura.

En los sólidos, la descarga por perforación del aislante se produce al cabo de largo tiempo de haber aplicado la tensión. Cuando se expone un aislante al efecto de una corriente alterna se desarrolla calor por efecto de la corriente de conducción y por iones deslizantes. La temperatura al aumentar disminuye la resistencia del dieléctrico, y por otra parte aumenta la movilidad de los iones deslizantes, el calor producido es entonces mayor que el calor disipado, y la temperatura aumenta a partir de cierto límite con rapidez creciente hasta que se produce la llamada "descarga térmica" que no se debe a sobretensiones de corta duración, sino a un voltaje excesivo para el material en servicio permanente. Si las pérdidas aumentan con el tiempo se produce la perforación, en cambio, si las pérdidas aumentan lentamente tendiendo a un valor límite, es posible que el material soporte la tensión en forma indefinida.

4.3 AISLADORES.

Después de los conductores, son los aisladores los elementos más importantes de una línea aérea, ya que estando aquellos desnudos es necesario un dispositivo aislante que los sostenga en posición adecuada y a distancia conveniente de partes estructurales, y otros conductores, incluyendo tierra. (Fig 4.1)

Los materiales más empleados en la construcción de aisladores son: la porcelana, el vidrio, la bakelita y otros derivados fenólicos, minerales volcánicos, sintéticos, plásticos, papel y madera parafinada.

Los aisladores por su construcción pueden ser de tipo alfiler ó tipo suspensión. Los aisladores tipo alfiler se encuentran fijados por medio de un perno ó alfiler que se sujeta a la cruceta en el poste ó a la estructura, la tendencia es limitar el uso de éstos aisladores a tensiones menores de 50 kv dado que su costo se incrementa rápidamente a medida que la tensión aumenta, resultando antieconómico.

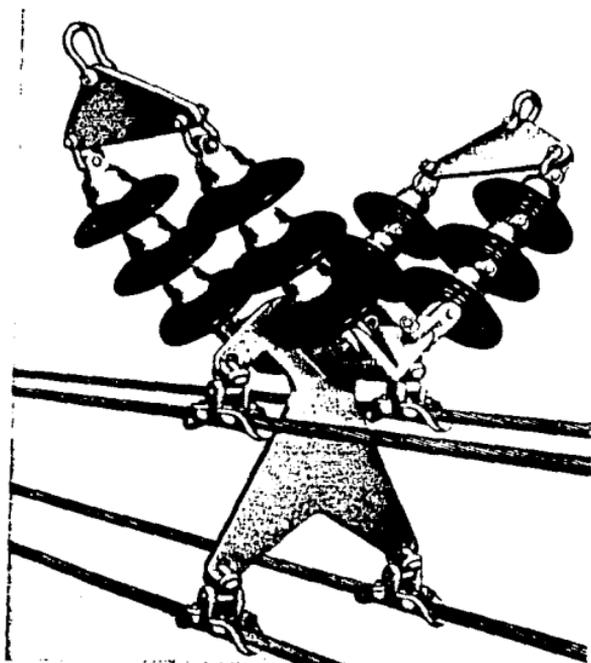


Fig. 4.1

Con los aisladores tipo suspensión el conductor se suspende debajo del soporte por medio de una cadena de aisladores. La cadena se compone de cierto número de discos, completos en sí mismos y enganchados ó articulados unos con otros a modo de obtener cierta flexibilidad en su conjunto.

La posición de cadena es vertical cuando se suspende por un extremo a la cruceta y en otro extremo se sujeta el conductor por medio de un porta-cable construido para oprimirlo sin que se escurra ó degüelle (Fig 4.2); la cadena también puede ser horizontal cuando se usa para anclar la línea de trecho en trecho ó para cambiar su dirección, en cuyo caso el cable queda sujeto por un ojillo y una mordaza especial para resistir la elevada tracción existente en la línea.

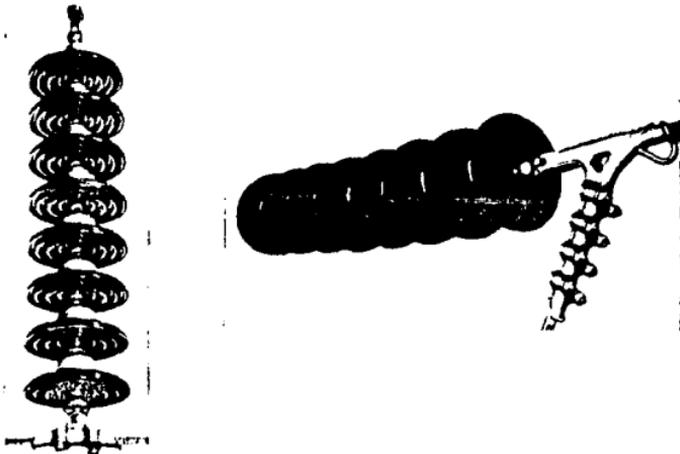
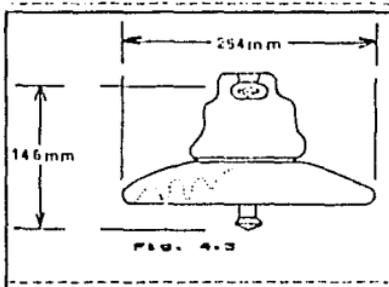
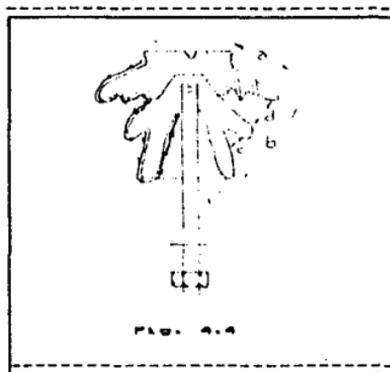


Fig. 4.2

El aislador de suspensión es usado casi exclusivamente en tensiones de 115 KV y mayores. Se adapta fácilmente a futuros cambios de tensión y las reparaciones de elementos dañados por arcos ó proyectiles no son tan costosas. Un tamaño normalizado de aisladores de suspensión es el de 254 x 146 mm. (Fig. 4.3)



Las dimensiones de un aislador están relacionadas con la tensión límite que puede soportar sin flamear, y con la corriente que se escapa a lo largo de su superficie, en general puede mencionarse la línea de escape superficial, línea de flameo en seco y línea de flameo en húmedo. (Fig. 4.4)



La línea de escape superficial es el contorno de la sección del aislador a partir de la garganta donde está el alambre de amarre ó la cachucha conectados al conductor, siguiendo toda la línea de trazo grueso indicada con flechas continuas. La medida de ésta línea es aproximadamente proporcional a la resistencia eléctrica que se opone al paso de electrones del conductor a tierra, ó viceversa, sobre la capa de polvo ó humedad depositados en la superficie del aislador; en consecuencia, la línea de escape debe crecer en proporción al potencial para limitar la fuga de corriente.

La línea de flameo en seco es la suma de los segmentos a, b, c y representa la longitud del arco más corto que puede formarse y con alguna aproximación representa la tensión más baja capaz de hacer flamear el aislador sin lluvia.

La línea de flameo húmedo está formada por segmentos alternados de superficie y aire, como se considera que el aislador está mojado y es conductor superficialmente, al medir la línea de flameo húmedo sólo se cuenta la parte de aire, y su longitud se reduce a la suma de las porciones d, e, c. La línea de flameo húmedo tiene longitud proporcional, aproximadamente, a la más baja tensión que puede iniciar un arco habiendo lluvia.

4.4 SELECCION DEL NUMERO DE AISLADORES.

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

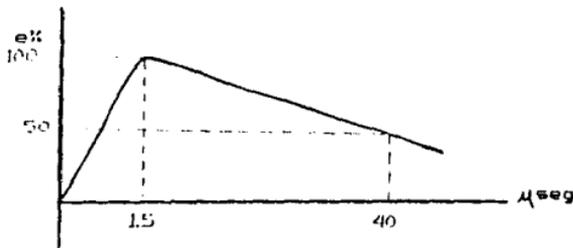
Los aisladores están sometidos normalmente a una diferencia de potencial alterna de baja frecuencia de 60 Hz resultante del voltaje de operación del sistema donde están instalados. También pueden someterse a voltajes de baja frecuencia en casos de fallas monofásicas ó bifásicas a tierra. Como los aisladores están colocados a la intemperie es necesario considerar su comportamiento con atmósfera seca y húmeda (lluvia, niebla ó nieve).

El parámetro dominante en el comportamiento de los aisladores sometidos a voltajes de baja frecuencia es la línea de escape superficial. En condiciones atmosféricas normales se considera adecuada una longitud de 2.5 cm de línea de escape superficial por cada Kv de fase a tierra. En atmósferas contaminadas es necesario aumentar la longitud de la línea de escape superficial utilizando aisladores de diseño especial.

La línea de flameo en seco y húmedo también determina el nivel de aislamiento para sobrevoltajes de baja frecuencia. Los aisladores se diseñan de manera que el voltaje necesario para perforar el material sea mayor al menos en un 30% que el voltaje necesario para flamear exteriormente el aislador.

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. El valor al que se flanea un aislador al que se aplican impulsos de voltaje depende tanto de la magnitud de los impulsos como del tiempo que estén aplicados.

Para uniformar las características de aisladores se fijó el nivel de aislamiento de las líneas basado en impulsos de voltaje con onda normalizada de 1.5×40 μ s y que indica el tiempo que transcurre entre el inicio de la onda y el máximo, y entre éste y el instante en que el potencial desciende a la mitad del máximo.



Se define el voltaje crítico de flameo de un aislador como el valor de cresta de la onda que causa el flameo del aislador en la cola de la onda el 50% de las veces que se aplica una onda normalizada de dicha magnitud.

El nivel de aislamiento al impulso (BIL) de un aislador es el valor de cresta de la onda de mayor magnitud que soporta el aislador sin flamearse.

A diferencia de los sobrevoltajes producidos por rayos, que son impulsos unidireccionales que alcanzan su valor de cresta en uno ó dos microsegundos y decaen en unas decenas de microsegundos, los sobrevoltajes debidos a la operación de interruptores son voltajes oscilantes de alta frecuencia con valores de 400 a 300 ciclos y que alcanzan su valor de cresta en cientos de microsegundos y que decaen en tiempos del orden de mil microsegundos. Las pruebas de laboratorio han demostrado que al aumentar la magnitud de éste tipo de sobrevoltajes, la distancia a través del aire para tener un nivel de aislamiento suficiente para que no se produzca un arco a tierra no aumenta proporcionalmente a la magnitud del voltaje.

Investigaciones en líneas de transmisión aéreas muestran que los accidentes sufridos han sido causados por rayos directos, casi exclusivamente, por lo cual el proyecto de las torres y la elección de los aisladores se rigen, actualmente, por la teoría de la descarga directa y la operación de interruptores. En consecuencia, se busca la reducción al mínimo de la impedancia a tierra de las torres; la colocación de los conductores dentro de un ángulo de 30° con la vertical que pasa por el cable de guarda cercano; una separación adecuada entre cables de guarda y conductores; y un nivel de aislamiento coordinado entre todos los aisladores del sistema.

Puede tenerse un número aproximado de aisladores normalizados de 254×146 mm de acuerdo a la tensión nominal de la línea y su altura sobre el nivel del mar consultando las tablas siguientes en las cuales puede darse una idea de las características de la línea. Es aproximado porque la determinación del número de aisladores se realice al hacer el diseño del aislamiento de la línea y coordinación del aislamiento lo cual no es objetivo del presente trabajo, además en este tema debe considerarse la disposición de los aisladores en forma ya sea vertical, horizontal & en "V"; niveles de contaminación, altura de

la cadena de aisladores, distancia al brazo de la torre, probabilidades de flameo, etc. Además, debido al gran avance tecnológico que ha habido en ciencia de materiales, actualmente se dispone de aisladores llamados "sintéticos" que presentan un gran ahorro de peso comparados con los de vidrio y porcelana y por consiguiente representan un ahorro en estructuras, además de que los efectos contaminantes se reducen al igual que el efecto corona y la radiointerferencia. Los materiales con que se fabrican van desde fibra de vidrio, etileno, propileno y resinas epoxicas.

La forma de usar las tablas es la siguiente:

Para cubrir el nivel básico de aislamiento al impulso por rayo en las líneas de transmisión aéreas se determine el número de aisladores estándar de 146 X 254 mm. Las relaciones entre los niveles básicos de aislamiento al impulso y las tensiones críticas de flameo son:

Para impulso por rayo $NBI = VCF(1.0 - 1.37)$

donde:

σ = desviación estándar que para rayo vale 3%

VCF = tensión crítica de flameo, que es la tensión con
50% de probabilidad de descarga disruptiva.

sustituyendo:

$$NBI = VCF(1.0 - 1.3 \times 0.03) = 0.961 VCF$$

NBI se ve afectado por la altitud sobre el nivel del mar debido al cambio de la densidad relativa del aire.

$$VCF = NBI/0.961$$

incluyendo la densidad relativa:

$$VCF = NBI/0.961r$$

NBI se obtiene de tablas recomendadas por el Comité Electrotécnico Internacional.

Puede entrarse a las tablas con VCF ó el voltaje y la altura sobre el nivel del mar para obtener el número aproximado de aisladores estándar requerido por la línea de transmisión y que son recomendadas por el CEI (Comité Electrotécnico Internacional).

Nivel de aislamiento al impulso de rayo para diferente número de aisladores estandar y diferentes altitudes - sobre el nivel del mar. (sin considerar efecto de humedad)

$$NBI = 0.961 \text{ VCF}$$

Número * de Aisladores	UCF KV (1)	NBI KV (2)	NBI (KV) Corrección por Altitud.			
			Metros sobre el nivel del mar.			
			0 - 500	501-1500	1501-2500	2501-3200
1	125	120	112	99	87	79
2	255	245	229	203	179	163
3	345	331	310	274	242	220
4	415	398	372	330	291	265
5	495	475	445	394	348	316
6	585	562	526	466	411	374
7	670	643	602	533	471	428
8	760	730	684	605	535	486
9	845	812	760	673	595	540
10	930	893	836	741	654	594
11	1015	975	913	809	714	649
12	1105	1061	994	880	777	706
13	1185	1138	1066	944	834	757
14	1265	1215	1138	1008	890	809
15	1345	1292	1210	1072	947	860
16	1425	1369	1282	1136	1003	911
17	1505	1446	1354	1200	1059	963
18	1585	1523	1427	1264	1116	1014
19	1665	1600	1499	1328	1172	1065
20	1745	1676	1570	1391	1228	1117
21	1825	1753	1642	1454	1284	1167
22	1905	1830	1714	1518	1341	1218
23	1985	1907	1786	1582	1397	1270
24	2065	1984	1859	1646	1454	1321
25	2145	2065	1934	1713	1513	1375
26	2220	2133	1998	1770	1563	1420
27	2300	2210	2070	1834	1619	1471
28	2375	2282	2138	1894	1672	1521
29	2455	2359	2210	1957	1729	1571
30	2530	2431	2277	2017	1781	1619

* Aisladores de 254 x 146 mm (10x5 3/4 plg)
Las columnas (1) y (2) dan valores en condiciones estandar de presión barométrica y temperatura a las cuales se pueden referir los calculos.

VALORES RECOMENDADOS PARA DISEÑO DE
LINEAS AEREAS

Tensión Nominal (KV)	Nivel Básico al impulso NBI (KV)	Longitud Max. de la Línea (KM)	Longitud Promedio del claro(metros)	Resistencia Máxima al pie de la torre(OHMS)	Nivel Isoce-reunico.
69	350	70	190	10	30
115	550	115	250	10	30
138	650	140	320	10	30
161	750	160	380	10	30
230	750	100 ó menos	450	10	30
230	900	230	450	10	30
345	1175	345	480	20	30
400	1300	100 ó menos	500	20	30
400	1425	400	500	20	30

NUMERO DE AISLADORES ESTANDAR DE 254 x 146 mm.
 REQUERIDO POR ALGUNAS LINEAS DE TRANSMISION A -
 DIFERENTES ALTITUDES (NO SE CONSIDERA EFECTO DE
 HUMEDAD).

NBI = 0961 VCF

Tensión Nominal (KV)	NBI recomendado - (KV)	Número de aisladores estandar de 254x146 mm.			
		Metros sobre el nivel del mar			
		0-500	501-1500	1501-2500	2501-3200
69	350	4	5	5	6
115	550	7	8	9	10
230	750	9	11	12	13
230	900	11	12	14	15
400	1300	17	19	22	24
400	1425	18	21	24	26
VALORES PARA TENSIONES DE MENOS USO EN LA REPUBLICA MEXICANA.					
138	650	8	10	12	13
161	750	9	11	14	15
345	1175	18	20	24	25

En las tablas:

NBI = Nivel Básico de Aislamiento

VCF = Voltaje Crítico de Flameo

$NBI = 0.961VCF$ es una relación obtenida a partir de la aplicación de distribuciones gaussianas relacionadas con probabilidades de flameo. Para sobretensiones por rayo se ha encontrado una relación entre la tensión crítica de flameo VCF y NBI dado como $NBI = VCF (1.0 - 1.3\sigma)$ donde σ es una desviación estándar que se obtiene de estudios experimentales. Para rayo $\sigma = 0.03$ recomendado por la Comisión Internacional de Electrotecnia. Sustituyendo se llega a $0.961VCF$. La desviación estándar se obtiene experimentalmente considerando el número de flameos y número de impulsos aplicados a una cadena de aisladores.

La tensión crítica de flameo para ondas de maniobra de interruptores se reduce aproximadamente 15% por condiciones de humedad con relación a la tensión crítica de flameo en seco, y por rayo éste factor puede ser despreciable.

4.5 EFECTOS DE LA CONTAMINACION EN LOS AISLADORES.

La contaminación es causada por una gran variedad de agentes como son: polvos obtenidos de la combustión de carbón ó petróleo, polvos de cemento, lluvia salina, irri-

gación con plaguicidas, fertilizantes, etc., éstos agentes cuando se mezclan por efecto de niebla ó lluvia ligera pueden reducir la tensión de flameo a la frecuencia nominal en aisladores de porcelana hasta la mitad y en ocasiones hasta una cuarta parte dependiendo del tipo y la densidad de contaminantes, así como de la frecuencia de las lluvias.

Este efecto debe ser considerado para líneas de transmisión en alta tensión con aisladores en posición vertical ó en "U", ya que en cadenas de aisladores en posición horizontal el depósito es distinto y la distancia de fuga es otra.

En un aislador la resistencia superficial se ve afectada por la contaminación depositada que forma capas conductoras continuas cuando hay humedad. Las corrientes de dispersión en éstas condiciones fluyen por éstas capas y el agua se evapora primero en aquellas áreas en donde el producto de la densidad de corriente y la resistividad de la superficie es mayor. Este procedimiento conduce a la formación de bandas de aislamiento secas de forma circular que tienden a ser cada vez más anchas hasta que la corriente de dispersión se reduce y no puede sostener evaporaciones subsecuentes.

La humedad & lluvias posteriores pueden traer como consecuencia que la resistencia del resto de porciones secas del aislador se reduzca gradualmente a pequeños flameos locales que ocurren sobre las secciones de las bandas secas sobre las cuales las mezclas de material contaminante se depositan. Una gran porción de la tensión total aparece, las superficies húmedas y los arcos se extienden rápidamente a toda la superficie del aislador y se puede tener un flameo completo.

Los flameos por contaminación ocurren con frecuencia bajo condiciones de niebla & lluvia salina, aunque también cuando los aisladores por humos & polvos quedan cubiertos en forma de agua contaminada por la humedad & bien por agua contaminada y en algunas ocasiones por hielo contaminado.

Para prevenir los flameos por efecto de la contaminación se conocen diversos métodos, entre los que se encuentran:

1) Lavado de aisladores con la línea en vivo por medio de chorros de agua a alta presión lanzados con mangueras. Este método requiere de equipo costoso y el agua que se usa debe ser limpia y en lugares fríos se debe emplear agua caliente & anticongelante no conductor.

2) Limpieza manual de aisladores en lugares con alto índice de contaminación, es un método costoso porque debe ponerse fuera de servicio la instalación.

3) Localizar cuidadosamente el lugar donde se instala la línea, ya que la contaminación puede variar considerablemente entre dos áreas cercanas.

4) Recubrir los aisladores con jalea de petróleo repelente al agua. La jalea es suave y absorbe las partículas sucias aislando unas de otras y previniendo que el agua no haga contacto con ellas. La jalea debe ser químicamente estable y no debe cambiar su estado gelatinoso con los cambios de temperatura, debe ser fácil de quitar y poner y se cambia cada 12 meses ó más dependiendo de la cantidad de contaminación.

5) Empleo de barnices sobre los aisladores de porcelana, con lo que la formación de humedad y anillos secos que conducen a los flameos se previenen.

4.6 PUESTA A TIERRA DE LAS TORRES.

La protección de las líneas de transmisión se obtiene por medio de apartarrayos, hilos de guarda y tomas de tierra. El objeto de la conexión a tierra es reducir al mínimo el peligro que presenta el sistema, por su propia energía ó por causas externas. Aunque se debe impedir que los rayos caigan sobre la línea usando hilos de guarda como pantalla protectora, esto no basta como protección total, ya que la corriente que fluye por la torre produce caídas de tensión que pueden provocar un retroceso del arco hacia los conductores activos y originar el flameo de los aisladores. Si un rayo cae en un hilo de guarda ó sobre la torre de transmisión y si la resistencia de tierra es grande, se puede producir un arco entre la torre y la li-

nea ó sobre los aisladores. Si la torre está bien conectada a tierra, el incremento de voltaje está limitado a un valor que corresponde de la resistencia de tierra a la onda de corriente y si existe una distancia apropiada entre los aisladores y conductores se puede impedir que salte el arco eléctrico.

Para obtener un nivel de protección determinado, se debe coordinar la resistencia de tierra con el blindaje y el aislamiento de la línea, y consiste en seleccionar uno ó dos hilos de guarda según sea la relación de protección y el número de elementos que constarán las cadenas de aisladores del sistema. Considerando que el aislamiento es proporcional a la resistencia de la tierra para las torres individuales y como el aislamiento es relativamente costoso al estar íntimamente relacionados el costo económico de una torre y la cantidad de porcelana de sus aislamientos, resulta más conveniente mejorar la tierra de la instalación que aumentar el aislamiento de la línea.

4.7 TOMAS DE TIERRA.

Los sistemas de transmisión tienen cierta conexión a tierra en las patas de las torres que son de acero. Sin embargo, la resistencia de la tierra obtenida de esta forma rara vez es lo suficientemente pequeña y necesaria para la protección contra descargas atmosféricas, por lo que se utilizan medios auxiliares de conexión a tierra.

Las tierras artificiales son de tres formas principales: placas de hierro colado ó inoxidable, con grueso de 6 mm ó más y superficie de 0.2 m² ó más, cada una; placas de cobre con igual superficie y grueso de 1.5 mm por lo menos, enterradas a un nivel inferior al de humedad permanente; tubos de fierro galvanizado para agua, con diámetro interior de 19 mm ó más, ó varillas de 250 mm² en fierro y 100 mm² en cobre de sección transversal, por lo menos, con longitud no menor de 2.5 m, hundidos verticalmente en toda su extensión, salvo que haya lecho de roca a menos de 1.2 m de profundidad, en cuyo caso los tubos ó varillas serán enterrados horizontalmente a la mayor profundidad posible; por último, alambres ó cintas de cobre desnudos de 13 mm² de sección, por lo menos, hundidos bajo el nivel de humedad permanente, y con una longitud apropiada a la naturaleza

del subsuelo, siendo conveniente que haya varios, unidos por el extremo superior y separándose en distintas direcciones en la parte inferior.

Para asegurar larga duración de los electrodos de cobre y de los conductores de conexión a ellos, se aconseja que estén esteñados. De las tres clases de electrodos, se considera que la mejor, por su resistencia óhmica y su costo, es la formada por tubos de fierro galvanizado, sin pintura ni esmalte en el exterior, que vendrían a disminuir el contacto, con la ventaja de no requerir excavación, a menos de que el suelo sea duro; y con un extremo puntiagudo ó aplanado para facilitar su penetración, y el otro protegido con una cachucha para recibir los golpes.

Si la resistencia de contacto a tierra es mayor de 25 ohms, será necesario colocar uno ó más tubos adicionales, separados uno de otro no menos de 1.8 m.

Para torres de transmisión se emplean electrodos de varillas sumergidos a una profundidad donde la humedad sea casi constante. Las varillas pueden ser de 3 a 15 metros y se colocan alrededor de la base de la torre debiendo estar separadas adecuadamente para obtener mejor conductividad.

En lugares donde el terreno es seco y existen capas rocosas cercanas a la superficie se utilizan uno ó más conductores desnudos enterrados a una distancia corta bajo la superficie extendiéndose alguna distancia desde la torre en dos ó más direcciones. Su efecto de protección es mejor mientras mayor sea su conductividad. El cobre enterrado es más resistente a la corrosión que el acero galvanizado, pero éste evita una asociación electrolítica, puede evitarse también con el cobre si se deja un pequeño entrehierro en la conexión.

En las figuras siguientes se ilustra la conexión a tierra remachada a la estructura de una torre y la conexión de las tomas de tierra en una línea con postes de madera. (Fig. 4.5)

4.8 MEJORAMIENTO DE LAS TIERRAS.

La conductividad de los elementos que constituyen la superficie de la tierra es muy baja comparada con la conductividad de los metales. Dos de los principales componentes de la tierra, el óxido de silicio y el óxido de aluminio son excelentes aislamientos; sin embargo, la conductividad del terreno se debe principalmente a la humedad y a sales absorbidas por éstos aislamientos.

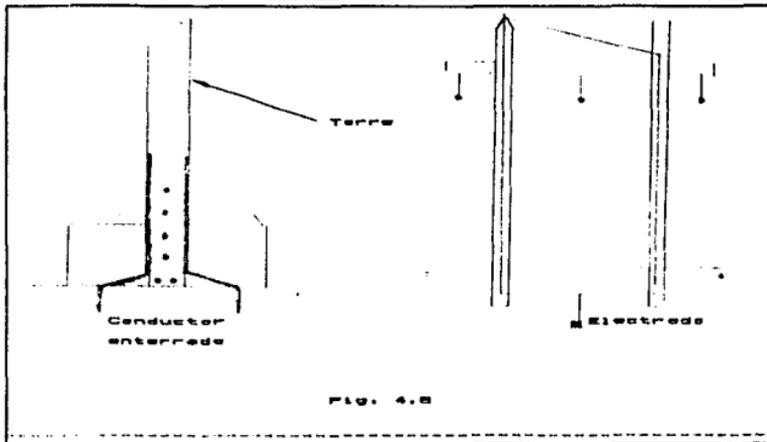


FIG. 4.8

Tratando de disminuir la resistencia de las tomas de tierra ò de conseguir un efecto equivalente, requisito necesario para el buen funcionamiento de la protecci3n por cables de guarda, se ha recurrido a tender largos trozos de cables enterrados, unidos a los pies de las torres. Este dispositivo se ha adoptado en terrenos rocosos ò arenosos donde las varillas, placas ò estacas usuales de toma de tierra resultan poco eficaces. Los conductores mencionados han sido denominados de "contrapeso", como lo indica su nombre, ademàs de la reducci3n de la resistencia, se espera

obtener alguna ventaja de la capacidad a tierra de los conductores y conseguir una reducción en la diferencia de potencial entre los conductores de línea y de tierra, debido a la inducción mutua entre los conductores de línea y de guarda con los de contrapeso.

Cuando la resistencia de la tierra es alta con relación a las necesidades, puede mejorarse por dos métodos:

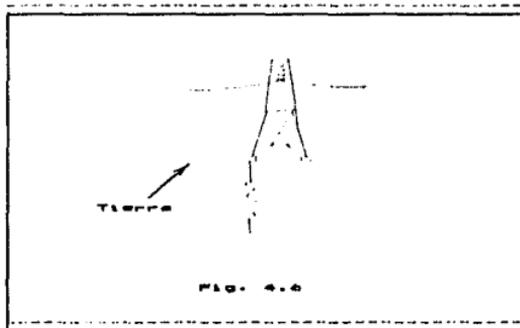
1.- ELECTRODOS MÚLTIPLES. Al aumentar el número de electrodos aumenta el número de trayectorias en paralelo a tierra, las distancias entre ellos deben ser adecuadas para evitar sobreposición de efectos, puesto que se considera que el 90% de la resistencia total esté comprendida dentro de una distancia de 1.8 a 3 metros del electrodo; por lo general ésta distancia es la que se guarda.

2.- TRATAMIENTO DEL TERRENO. El tratamiento del terreno se hace con el fin de disminuir la resistencia de impulso del mismo. El método que se sigue es de disolver en la humedad natural del terreno sustancias de alta conductividad en solución acuosa, dichas sustancias son: sulfato de cobre, cloruro de calcio, sulfato de magnesio y cloruro de sodio; estas dos últimas son las que más comúnmente se utilizan.

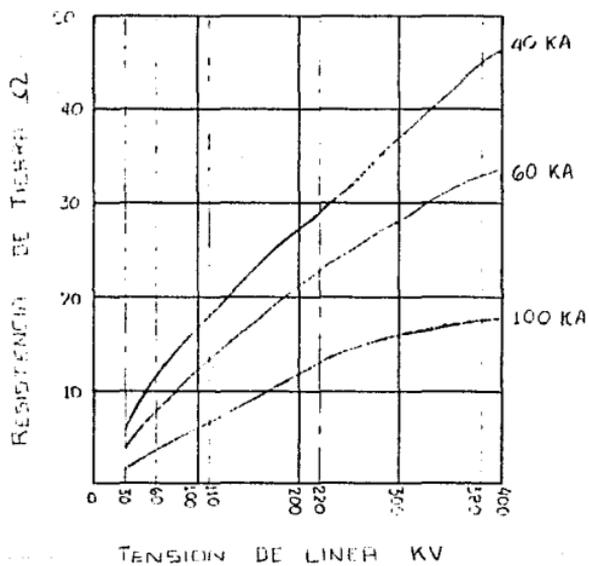
4.9 RESISTENCIA DE CONEXION A TIERRA DE LAS TORRES.

Las torres de las líneas de transmisión aéreas se conectan sólidamente a tierra, tomando grandes precauciones para asegurarse de que la resistencia a tierra sea baja. De ésta forma, cuando cae un rayo sobre la línea aparece súbi-

tamente una fuerte sobretensión en los aisladores que se mantiene hasta que la corriente del rayo descarga a tierra. Tal sobretensión puede provocar un arco y la correspondiente salida de la línea. (Fig. 4.6)



La gráfica siguiente proporciona las curvas con las que se determina el valor de la resistencia máxima admisible de las tomas de tierra en donde se sitúan las torres ó los postes de la línea con el fin de impedir la formación de arcos eléctricos, según la tensión de la línea con distintos valores de corriente de descarga atmosférica.



CAPITULO 5.
ASPECTOS
MECANICOS.

CAPITULO 5.

ASPECTOS MECANICOS.

5.1 SOPORTES PARA LINEAS DE TRANSMISION.

Para llegar de un lugar a otro, los conductores requieren de apoyos, que pueden ser torres, postes u otro tipo de construcción de acero, hormigón ó madera. La elección del apoyo depende del terreno que se va a cruzar, de la medida de los conductores y del equipo que soportará. La elección del material está determinada por lo que se puede conseguir y las razones económicas, así como por las condiciones atmosféricas.

Para líneas de transmisión aéreas existen básicamente dos tipos de soportes que son: los postes T que pueden ser de concreto armado ó de madera y las torres de acero. En el diseño de los soportes es necesario tomar en cuenta las sobretensiones eléctricas por rayo y por maniobra de interruptores, ya que influyen en el diseño económico del soporte considerando el efecto de proximidad a las estructuras metálicas que se encuentran conectadas a tierra.

Los postes de concreto & madera se emplean en distribución urbana y rural en líneas de 34.5 Kv & menores y hasta 69 Kv con claros no mayores de 60m. En electrificación rural los postes de madera tienen un valor inicial inferior a los postes de concreto & metálicos, aunque su vida es en cierto modo incierta debido a su localización y el tratamiento que se les da antes de su montaje, se fabrican de pino, cedro & castaño. En la elección de los postes deben considerarse dos factores: longitud y resistencia requeridas. La longitud depende de la distancia necesaria con respecto a la superficie del terreno, del número de crucetas que se van a montar y demás material que pueda instalarse. También se debe tener en cuenta las agregaciones futuras de crucetas, transformadores y otros dispositivos. Los postes se hacen a medidas estandarizadas que van desde 7.62 hasta 27.43 metros de largo con 1.52 metros de diferencia entre una y otra medida, es decir, 7.62, 9.14, 10.67 metros, etc. También se dispone de postes especiales que tienen más de 27.43 y menos de 7.62 metros.

La resistencia necesaria de un poste está determinada por el peso de los crucetas, aisladores, cables, transformadores y demás material que debe soportar, así como también por las cargas debidas al hielo y al viento. Todas estas fuerzas tienden a quebrar el poste a nivel del

suelo. La formación de hielo alrededor de los conductores ofrece al viento una gran superficie.

Las fuerzas ejercidas sobre una línea debido al hielo y al viento dependen de las condiciones climáticas, que varían en las diversas regiones del país.

La tendencia a la flexión de un poste es aumentada por la fuerza ejercida por los conductores en los postes. Normalmente de ambos lados de un poste se suspenden tramos de conductores de igual longitud. Sin embargo, en caso de que en un tramo se rompa uno de ellos ó haya más cantidad de alambre de un lado que de otro, entonces los esfuerzos desequilibrados de tracción tienden a empujar al poste hacia un costado y lo hacen propenso a romperse al nivel del suelo.

Aunque los postes pueden tener la misma longitud, su distinto grosor a nivel del suelo les da diversas resistencias. Las condiciones del suelo, la altura del poste y los factores de peso y tracción deben ser considerados para resolver a qué profundidad es preciso enterrarlo.

Los postes de concreto reforzado tienen un alto costo inicial, pero a cambio una larga vida, los aisladores usados con este tipo de postes así como con los de madera son por lo general tipo alfiler debido a que en distribución y subtransmisión el arreglo soporte-aislador resulta más barato.

En redes de subtransmisión ó suburbanas de 132 Kv y tensiones superiores por lo general se usan torres como soportes debido a que se requieren bases suficientemente amplias para soportar los altos esfuerzos mecánicos que se presentan. Si por alguna razón uno ó varios conductores se rompen la torre sufre un jalón en adición al esfuerzo de tensión normal debido a las cargas longitudinales y transversales. Los esfuerzos de tensión longitudinal ó jalones se presentan también cuando se tienen claros de diferente longitud ó cuando se tienen cambios frecuentes de dirección en el trazo de la línea.

En líneas de 132 Kv y superiores se emplean por lo general conductores ACSR que se soportan por medio de cadenas de aisladores de 254 x 146 mm de vidrio ó porcelana para suspensión cuyo número varía de acuerdo a la tensión y que aumentan el peso de la torre.

En los cruces de ríos se requieren torres grandes y robustas, así como en los puntos en donde la trayectoria tiene cambios de dirección. Las bases de las torres son por lo general de concreto y su complejidad depende de la naturaleza del suelo y los esfuerzos a que estará sujeta, ya que puede haber claros que van de 270 a 500 metros dependiendo del tipo de torre, tensión de operación, tipo de conductores y configuración del terreno. Las torres metálicas tienen la ventaja de ser flexibles por sus características de fabricación, ya que se hacen en ángulo remachado y por secciones que pueden ser transportadas al sitio de montaje antes de la instalación, lo que reduce los costos de transporte, se montan sobre bases de concreto.

Los postes de concreto, madera ó acero usan crucetas de acero galvanizado que se fijan con abrazaderas en forma de "U" de fierro galvanizado redondo, las dimensiones son variables según la tensión eléctrica de operación y el tamaño del poste. También se emplean crucetas de madera para fijar alfileres de acero.

5.2 FLECHAS Y TENSIONES MECANICAS EN LOS CONDUCTORES.

El empleo de apoyos elevados para una línea de transmisión con conductores desnudos es de necesidad evidente.

La altura de los apoyos debe ser la suma de la distancia mínima al suelo de los conductores, y la flecha máxima de éstos al quedar suspendidos. La distancia mínima depende de la tensión nominal y de la clase de tránsito que haya debajo ó cerca de la línea. En lo que pertenece al derecho de vía debe tomarse en cuenta el paso de carros cargados, máquinas agrícolas y de caminos, jinetes, etc. y dejar un margen amplio para evitar un arco, pues a pesar de que el terreno es exclusivo para la transmisión, no siempre se puede evitar el tránsito mencionado.

Para líneas de 15 a 50 Kv, el Reglamento de Obras e Instalaciones Eléctricas fija un mínimo de 9 metros de distancia al suelo de los conductores sobre vías férreas, 7 m sobre carreteras, calles y caminos vecinales, y 5 m sobre espacios no transitados por vehículos; aumentando 1.25 cm por cada kv en exceso sobre 50 para líneas de mayor tensión.

En condiciones normales de montaje y sin considerar los elementos adicionales que intervienen en el cálculo mecánico de los conductores de una línea de transmisión como son presión del viento, carga de hielo, etc, la altura del conductor en el centro del claro con estructuras y soportes a igual nivel debe ser menor que la altura de los puntos de soporte en las estructuras, la diferencia entre estas alturas es lo que se conoce como la flecha del conductor. El conocimiento de los valores de las flechas en las distintas etapas de la línea de transmisión es importante para saber las alturas mínimas del conductor sobre el suelo.

La flecha depende del claro entre apoyos, peso y temperatura del conductor, etc, de manera que, a medida que se aumenta la distancia interpostal los apoyos deben ser más altos. Para una longitud de claro dada, a mayor tensión mecánica aplicada la flecha es menor, sin embargo hay un límite de tensión mecánica aplicada que está dado por las limitaciones impuestas por la estructura desde el punto de vista de fuerzas máximas para mantener su equilibrio y por el propio conductor.

Si se dejan flechas muy grandes para no provocar esfuerzos mecánicos en estructuras, soportes y conductores,

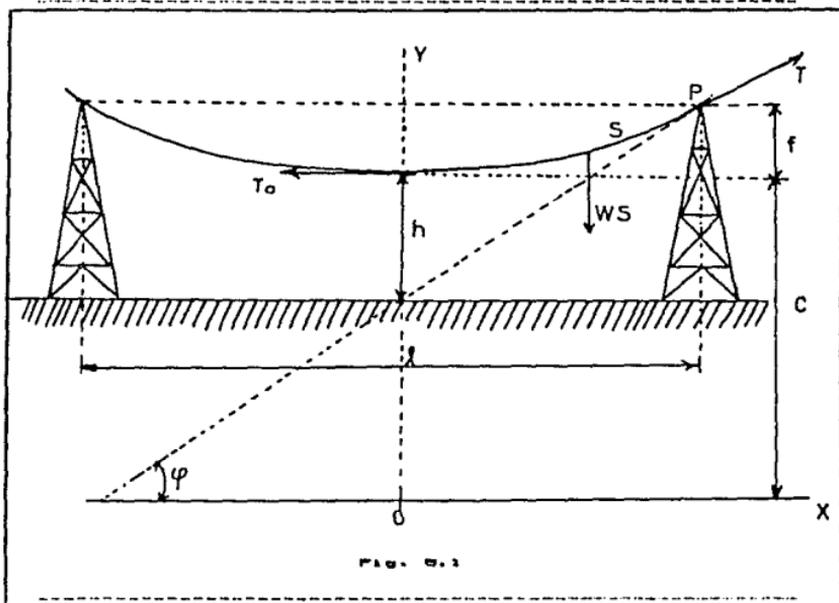
entonces se deben usar torres más altas con el objeto de satisfacer el requerimiento de las distancias mínimas al suelo y brazos más largos para prevenir el choque de conductores durante fuertes vientos.

Para conocer la flecha y las tensiones mecánicas en los conductores se dispone de dos métodos: método de la catenaria y método de la parábola.

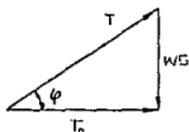
METODO DE LA CATENARIA:

Un conductor de constitución uniforme entre dos soportes a igual nivel toma la forma de una catenaria: (Fig. 5.1)

Sea un conductor suspendido de dos soportes que se encuentran en un mismo nivel referido a un sistema x, y donde el eje "y" forma el punto medio del claro y el eje x paralelo al nivel del suelo, donde l es el claro ó distancia interpostal, h la altura mínima sobre el nivel del suelo, AO la distancia del eje x a la flecha, W es el peso del conductor por metro y S es la longitud del conductor para la porción AP mostrada, T es la tensión aplicada en el punto P en Kg_{\uparrow} , T_0 es la tensión en el punto medio del claro en Kg_{\uparrow} que se iguala a WC donde C es una longitud indeterminada, WS es el peso del conductor en el tramo AP en Kg_{\uparrow} .



Formando el triángulo de fuerzas y aplicando el teorema de Pitágoras se establece la ecuación de equilibrio:



$$T^2 = (WC)^2 + (WS)^2$$

$$T^2 = W^2(C^2 + S^2)$$

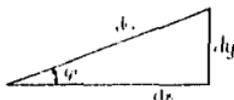
$$T = W/\sqrt{C^2 + S^2} \dots \dots \dots (1)$$

de la figura: $\tan\varphi = WS/T_0 = WS/WC = S/C$.

$$S = C \tan\varphi \dots\dots\dots (2)$$

Si S representa una porción pequeña de la longitud del conductor puede tomarse como elemento diferencial:

$$\cos\varphi = dx/ds$$



del triángulo de fuerzas $\cos\varphi = T_0/T = dx/dS = WC/W\sqrt{C^2+S^2}$

$$\cos\varphi = dx/dS = C/\sqrt{C^2+S^2}$$

multiplicando ambos miembros por dS e integrando:

$$\int dx/dS * dS = \int C/\sqrt{C^2+S^2} dS$$

$X = C \operatorname{Senh}^{-1} S/C + k_1$ donde k_1 es la constante de integración.

Cuando $X = 0$, $\varphi = 0^\circ$ y $\cos\varphi = \cos 0^\circ = 1.0$

$$\cos\varphi = C/\sqrt{C^2+S^2}$$

$$C/\sqrt{C^2+S^2} = 1.0$$

$$C = \sqrt{C^2+S^2}$$

$$S = 0$$

$$\operatorname{Senh}^{-1} S/C = 0$$

$$k_1 = 0$$

$$y \quad x = C \operatorname{Senh}^{-1} S/C$$

$$x/C = \operatorname{Senh}^{-1} S/C$$

$$S/C = \text{Senh } x/C \dots\dots\dots (3)$$

como $S/C = \tan \varphi = dy/dx$

$$dy/dx = \text{Senh } x/C$$

Multiplicando ambos miembros por dx e integrando:

$$Y = \int \text{Senh } X/C \, dx = C \cosh X/C + k_2$$

k_2 es la constante de integración, si $A_0 = C$ en el origen cuando $X = 0$, $Y = C \cosh(0) + k_2$, $A_0 = C = Y$, $Y = Y + k_2$,

$k_2 = 0$ y entonces:

$$Y = C \cosh X/C \dots\dots\dots (4)$$

de (3): $S/C = \text{Senh } X/C$ $S = C \text{Senh } X/C$

elevando al cuadrado: $S^2 = C^2 \text{Senh}^2 x/C \dots\dots\dots (5)$

elevando la ecuación (4) al cuadrado:

$$Y^2 = C^2 \cosh^2 x/C \dots\dots\dots (6)$$

restando (5) a (6):

$$Y^2 - S^2 = C^2 (\cosh^2 x/C - \text{Senh}^2 x/C)$$
$$Y^2 - S^2 = C^2$$

despejando Y: $Y = \sqrt{C^2 + S^2} \dots\dots\dots (7)$

sustituyendo (7) en (1): $T = WY \dots\dots\dots (8)$

La ecuación (8) indica que la tensión en cualquier punto de coordenadas (X,Y) sobre el conductor es WY Kg fuerza; de acuerdo con la ecuación la tensión es mínima en el punto medio del claro y máxima en los puntos de soporte del

conductor. La tensión máxima se presenta cuando $Y=C+f$,
sustituyendo en (7):

$$Y = \sqrt{C^2 + S^2} = C + f$$

elevando al cuadrado ambos miembros:

$$C^2 + S^2 = (C+f)^2 = C^2 + 2Cf + f^2$$

de donde: $C = (S^2 - f^2) / 2f$

si $Y=C+f$ entonces:

$$T_{max} = WY = W(C+f) = W(S^2 - f^2 / 2f + f)$$

$$T_{max} = W(S^2 - f^2 / 2f + f) \dots \dots \dots (9)$$

La tensión mínima ocurre en el punto medio del claro,
cuando $Y=C$ metros:

$$T_{min} = WY = WC = W(S^2 - f^2) / 2f \text{ Kg} \dots \dots \dots (10)$$

También fijados los valores de tensiones máximas y
mínimas a aplicar, partiendo de la ecuación (9) puede
determinarse la flecha f cuyo valor debe dar una altura
mínima sobre el nivel del suelo de acuerdo con el
reglamento de obras e instalaciones eléctricas; de la ec.
(9):

$$2fT_{max} = WS^2 + Wf^2$$

$$Wf^2 - 2fT_{max} + WS^2 = 0$$

dividiendo entre W :

$$f^2 - 2T_{max}f / W + S^2 = 0 \dots \dots \dots (11)$$

La solución de (11) es:

$$f = 2T_{max}/W \pm \sqrt{4T_{max}^2/W^2 - 4S^2}/2 \dots \dots \dots (12)$$

para tener solución real:

$$4T_{max}^2/W^2 \geq 4S^2$$

en el caso límite:

$$4T_{max}^2/W^2 = 4S^2$$

$$\text{y } T_{max} = WS \dots \dots \dots (13)$$

en las ecuaciones (9),(10),(11) las cantidades que intervienen son la flecha f , las tensiones T , y la longitud del conductor al punto medio del claro S .

De (13) $T_{max} = WS$

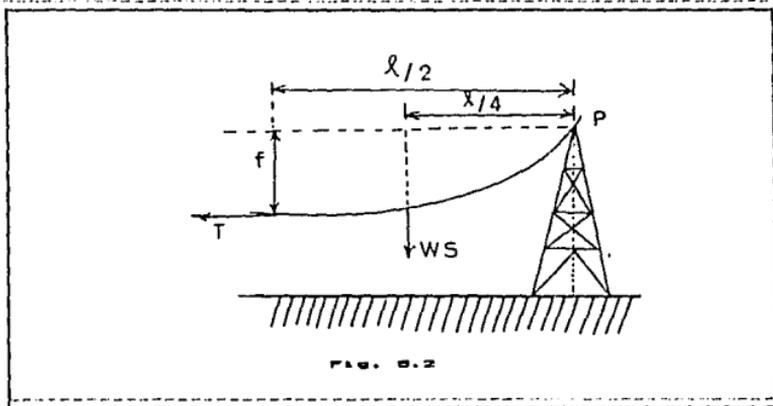
la longitud curvada del conductor es: $S = T_{max}/W$

En el diseño se usa el valor mayor de f que se obtiene en la ecuación (12).

METODO DE LA PARABOLA:

Se puede afirmar genéricamente que en la mayoría de las líneas la flecha es pequeña comparada con el claro, de manera tal que en forma aproximada se puede decir que la longitud del conductor curvado por su flecha es aproximadamente igual a la longitud del claro por lo que:

$S=1/2$, se puede suponer que el peso para la mitad del claro se encuentra concentrado en $1/4$. (Fig. 5.2)

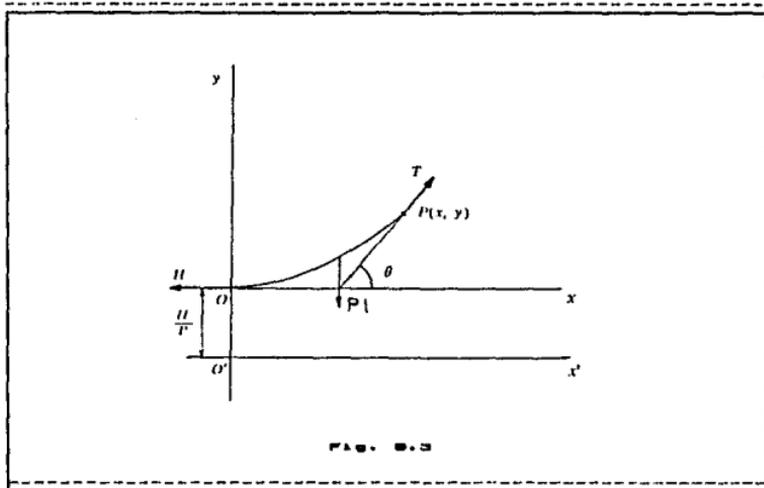


De la figura, tomando momentos con respecto a P:

$$T \times f = WS \times 1/4 \quad \text{pero } S=1/2 \quad T \times f = W \times 1/2 \times 1/4$$

$$T \times f = Wl^2/8 \quad T = Wl^2/8f$$

Puede desarrollarse el método de la parábola a partir del método de la catenaria: (Fig. 5.3)



de la figura: l es la longitud del arco de la catenaria, T la tensión mecánica en el punto P , H tensión mecánica En el punto inferior de la catenaria, p peso del cable por unidad de longitud.

La ecuación cartesiana de la catenaria es:

$$y = H/p \cosh px/H$$

desarrollando el coseno hiperbólico en una serie infinita:

$$y = H/p (1 + p^2 x^2 / 2H^2 + p^4 x^4 / 24H^4 + \dots)$$

pueden tomarse los dos primeros términos de la serie si en el cable de la línea de transmisión la flecha es menor que el 10% del claro, sin cometer un error apreciable:

$$y = H/P + px^2/2H \dots \dots \dots (a)$$

la ecuación (a) es la ecuación de una parábola. Las expresiones de la flecha, la longitud del cable y la tensión en los soportes, suponiendo que el cable adopta la forma de una parábola, quedan como sigue:

la flecha está dada como: $f = y = H/P$

Sustituyendo en la ecuación anterior el valor de y dado por la ecuación (a) y haciendo $x = d/2$ donde d es el claro:

$$f = pd^2/8H \dots \dots \dots (b)$$

para la longitud del cable puede partirse de la ecuación del arco de la catenaria que es: $L = 2H/P \operatorname{Senh} pd/2H$ desarrollando el seno hiperbólico en una serie infinita:

$$\operatorname{Senh}_u = u + u^3/3! + u^5/5! + \dots$$

y tomando los dos primeros términos de la serie:

$$L = 2H/P(pd/2H + p^3d^3/48H^3)$$

$$L = d + p^2d^3/24H^2 \dots \dots \dots (c)$$

La ecuación (c) nos da la longitud del cable, ésta también puede expresarse en función de la flecha partiendo de la ecuación (c):

$$p^2 d^2 / 24 H^2 = p^2 d^4 / 64 H^2 \times 8 / 3 d$$

elevando la ecuación (b) al cuadrado:

$$p^2 d^4 / 64 H^2 = f^2$$

por lo que resulta: $L = d + 8 f^2 / 3 d \dots \dots \dots (d)$

La tensión mecánica en los apoyos se deduce partiendo de la expresión que da la tensión mecánica aplicando el método de la catenaria: $T_a = H \cosh pd/2H$, donde T_a es la tensión mecánica en los apoyos. Desarrollando el coseno hiperbólico en una serie infinita y tomando únicamente los dos primeros términos se tiene:

$$T_a = H(1 + p^2 d^2 / 8 H^2) = H + p^2 d^2 / 8 H \dots \dots \dots (e)$$

Cuando se conoce la tensión en los apoyos T_a , la tensión horizontal H puede obtenerse aplicando la ecuación siguiente:

$$H = T_a - p^2 d^2 / 8 T_a$$

A menudo se obtienen resultados muy aproximados suponiendo que $H = T_a$, ya que se trata de suponer que el cable adopta una forma parabólica.

Cuando en los terrenos donde se construyen las líneas de transmisión existen zonas montañosas, es necesario considerar las flechas y tensiones en líneas con soportes a distinto nivel. Los métodos de cálculo en conductores de líneas que se encuentran en un mismo nivel se extienden para líneas a distinto nivel con algunas modificaciones, en donde en términos generales el conductor toma la forma de una catenaria, aunque para el cálculo se puede partir del método parabólico.

Los datos del problema son:

a = claro entre apoyos a distinto nivel
 d = proyección horizontal del claro a
 h = diferencia de nivel entre los apoyos
 p = peso del cable por unidad de longitud
 T_2 = tensión mecánica en el soporte superior.

Si el desnivel es pequeño comparado con el claro, el problema puede resolverse calculando la flecha f para un claro con apoyos a un mismo nivel, de longitud igual a la proyección horizontal del claro inclinado y a partir de f calcular las flechas f_1 y f_2 haciendo uso de las fórmulas de la parábola, como se deduce a continuación: (Fig. 5.4)

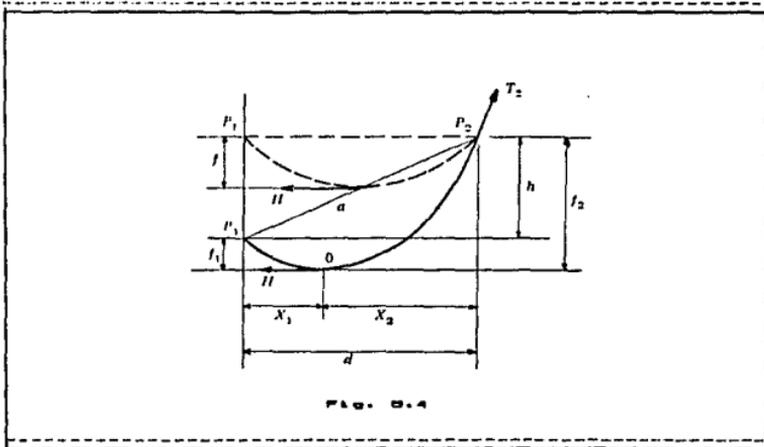


FIG. 8.4

OP1 es la mitad del arco de la catenaria, para un claro igual a $2x_1$, con apoyos al mismo nivel. OP2 es la mitad del arco de la catenaria, para un claro igual a $2x_2$, con apoyos al mismo nivel.

Aplicando las fórmulas de la parábola:

$$h = f_2 - f_1 = pX_2^2/2H - pX_1^2/2H$$

factorizando: $h = (p/2H)(X_2^2 - X_1^2)$

pero:

$$h = p/2H(X_2 + X_1)(X_2 - X_1)$$

$$\gamma(X_2 - X_1) = d \dots \dots \dots (1)$$

por lo que: $h = pd/2H (x_2 - x_1)$ (2)

resolviendo el sistema (1),(2): $x_2 = d/2 + Hh/pd$

$$x_1 = d/2 - Hh/pd$$

para el claro con apoyo al mismo nivel P1'P2 se cumple que:

$$f = pd^2/8H'$$

pero prácticamente $H'=H$ y $f = pd^2/8H$

por lo que: $H/P = d^2/8f$

Sustituyendo la expresión H/P en la solución del sistema de dos ecuaciones simultáneas:

$$x_2 = d/2 + d^2/8f * h/d$$

$$x_2 = d/2(1 + h/4f)$$

$$x_1 = d/2(1 - h/4f)$$

considerando apoyos a un mismo nivel:

$$f_1 = p(2x_1)^2/8H$$

$$f_2 = p(2x_2)^2/8H$$

Sustituyendo los valores de x_1, x_2 en f_1, f_2 se tiene:

$$f_1 = f(1 - h/4f)^2$$

$$f_2 = f(1 + h/4f)^2$$

5.3 VARIACION DE LA REACTANCIA CAPACITIVA RESPECTO A LA ALTURA DE LOS CONDUCTORES.

En líneas de transmisión aéreas de voltaje mayor a 220 KV generalmente ocurre que la distancia entre fases es del mismo orden que la distancia a tierra de los conductores, lo que trae consigo que varíe la reactancia capacitiva al considerar el efecto de la tierra y el cual incluye la altura de los conductores.

La presencia de cuerpos conductores próximos a los cables de la línea, como la tierra y los hilos de guarda, hace aumentar ligeramente la capacitancia de la línea. Si el voltaje es fijo, la proximidad de cuerpos conductores se manifiesta como un aumento de la carga eléctrica de los cables con respecto a la carga que se tiene considerando únicamente el dieléctrico que rodea a los conductores de la línea y que para líneas aéreas es el aire.

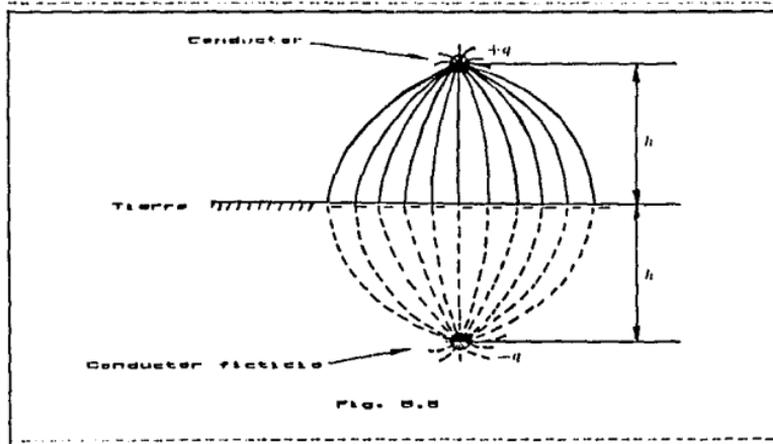
Cuando no se considera el efecto de la tierra la reactancia capacitiva está dada por la relación:

$$X_c = 6.596 / f k \log_{10} D.N.G. / R.N.G.c \quad M\Omega - Km/fase$$

donde:

- $k = e/\epsilon_0$ constante dieléctrica que vale uno para el aire
- $e =$ permitividad del medio
- $\epsilon_0 =$ permitividad del vacío
- $f =$ frecuencia del sistema
- $R.M.G.c = (nr_e R^2)^{1/2}$
- $n =$ conductores por fase
- $r_e =$ radio exterior de cada conductor
- $R =$ radio del círculo donde se disponen simétricamente los n conductores.

Cuando se considera el efecto de la tierra se considera un conductor ficticio enterrado debajo de la tierra a una distancia igual a la altura del conductor respecto al suelo, el conductor ficticio es una imagen del conductor sobre la tierra y posee una carga igual en magnitud, pero de signo opuesto a la del conductor. (Fig. 5.5)



Al considerar el efecto de la tierra, la expresión para la reactancia capacitiva es la siguiente:

$$X_c = 6.595/fk \text{ Log}_{10} \text{ DMG/RMGc} \times 2\text{HMG} / \sqrt{4(\text{HMG})^2 + (\text{DMG})^2}$$

donde:

H.M.G. = $\sqrt{h_1 h_2 h_3}$ = altura media geométrica de los tres conductores sobre el piso
h1, h2, h3 = alturas medias de los tres conductores.

Las unidades de Xc son MΩ - Km/fase.

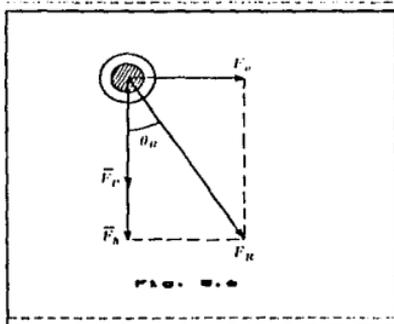
5.4 AUMENTO DE LA CARGA DEL CABLE POR HIELO Y VIENTO.

Cuando los conductores están en servicio no sólo están sujetos a esfuerzos debidos a su propio peso, sino también a la presión ejercida por el viento y en condiciones de clima frío a la formación de capas de hielo cilíndricas alrededor del conductor.

Para calcular la tensión mecánica de los conductores se considera como carga total la resultante del peso del conductor y la fuerza producida por el viento, actuando ésta horizontalmente y perpendicular con la sección transversal del conductor. En las regiones donde puede depositarse hielo sobre los conductores, se considera el peso del hielo y el aumento de la fuerza ejercida por el

viento debido al aumento de superficie expuesta a causa de la acumulación de hielo.

Si hacemos el diagrama de cuerpo libre del conductor nos queda: (Fig. 5.6)



donde:

F_p = fuerza debida al peso propio del conductor actuando verticalmente hacia abajo.

F_v = fuerza ejercida sobre el conductor por el viento

F_h = fuerza debida al peso del hielo acumulado sobre el conductor y que actúa hacia abajo.

de la figura:

$$F_R = \sqrt{(F_p + F_h)^2 + F_v^2}$$

$$\theta_R = \tan^{-1} F_v / (F_p + F_h)$$

Y el efecto del viento y hielo queda considerado al sustituir F_r por el peso del conductor en las expresiones para calcular las flechas y las tensiones en una línea de transmisión.

De estudios de mecánica se obtiene la expresión que nos determina la presión dinámica producida por el viento sobre una superficie:

$$P_v = C_f C_1 \rho v^2 / 2g$$

donde:

- P_v = presión dinámica producida por el viento en Kg/m^2
- ρ = peso del aire por unidad de volumen que es igual a 1.225 Kg/m^3
- v = velocidad del viento en m/seg
- g = aceleración debida a la gravedad y que es igual a 9.81 m/seg^2
- C_f = constante que depende de la forma de la superficie y que toma los valores de 2.0 para superficies planas, 1.2 para superficies cilíndricas lisas y 1.45 para superficies cilíndricas de cables
- C_1 = constante que depende de la longitud del claro y que varía entre 0.38 y 0.6, dicha constante se debe a que las ráfagas de viento tienen un frente que no abarca todo un tramo entre apoyos.

Para las líneas de transmisión puede tomarse $C_1 = 0.55$ y C_f toma el valor de 1.45, sustituyendo los valores en la ecuación:

$$P_v = 1.45 \times 0.55 \times 1.225 v^2 / 2 \times 9.81$$

$$P_v = 0.04979 v^2 \quad \text{Kg/m}^2$$

La velocidad del viento se obtiene de cartas determinadas experimentalmente al igual que temperaturas, depósito de hielo, etc. de acuerdo con datos estadísticos reportados de observatorios y estaciones metereológicas. Las velocidades máximas que se consideran en la práctica varían entre 50 y 20 m/seg, dependiendo de la región.

La fuerza total ejercida por el viento se obtiene al multiplicar la presión del viento por el área total proyectada normalmente a la dirección del viento.

5.5 EJEMPLO DE CALCULO.

A continuación se presenta un cálculo teórico respecto a los aspectos mecánicos tratados:

Una línea de transmisión usa cables de cobre desnudos de 4/0 A.W.G. 7 hilos, tiene un claro de 200 metros entre torres colocadas al mismo nivel.

- a) Calcular la flecha del cable con las fórmulas de la parábola y la catenaria.

- b) Calcular la flecha para las condiciones de tensión máxima que se producen a una temperatura de -10°C , con una presión del viento de 40 Kg/cm^2 y con depósito de hielo sobre los conductores de 1.0 cm de espesor.

Suponer que la tensión máxima de trabajo de los cables es igual al 50% de la tensión de ruptura del cable.

Solución:

a) Según la fórmula de la parábola $f = pd^2/8H$ la tensión mecánica en el punto medio del claro puede conocerse con las características del cable 4/0 A.W.G.:

diámetro exterior = 13.2 mm .

peso = 913 Kg/Km .

tensión de ruptura = 4152 Kg .

Como la tensión máxima de trabajo es el 50% de la tensión de ruptura y suponiendo que la tensión en los apoyos es la misma que en la parte más baja de la flecha se tiene:

$$H = T_s = 2076 \text{ Kg.}$$

el peso del conductor por metro es:

$$913 \text{ Kg/Km} \times \text{Km}/1000\text{m} = 0.913 \text{ Kg.}$$

$$f = (0.913)(200)^2/8(2076) = 2.199 \text{ m.}$$

Por el método de la catenaria:

$$H = T_0 - (p^2 d^2) / 8T = 2076 - (0.913)^2 (200)^2 / 8(2076)$$

$$H = 2073.992 \text{ Kg.}$$

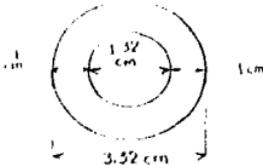
$$f = H/P((\text{Cosh}(pd/2H) - 1))$$

$$f = 2073.992/0.913((\text{Cosh}((0.913 \times 200)/(2 \times 2073.992)) - 1))$$

$$f = 2.201 \text{ m.}$$

Si en la fórmula de la parábola tomamos $H = 2073.992 \text{ Kg}$ se obtiene el mismo resultado.

b) Considerando el hielo en el cable:



el volumen de hielo por metro de conductor es:

$$V = \pi (D_{\text{ext}}^2 - D_{\text{int}}^2) / 4 \times 1.0 \text{ m.}$$

sustituyendo:

$$V = \pi ((3.32)^2 - (1.32)^2) / 4 \times 100 = 728.85 \text{ cm}^3.$$

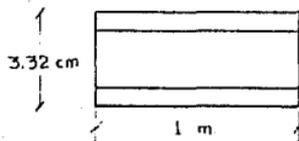
si suponemos que la densidad del hielo es de 1000 Kg/m^3 el peso del hielo por metro de conductor es:

$$P_H = 728.85 \text{ cm}^3 \times 1000 \text{ Kg/m}^3 \times \text{m}^3 / (100)^3 \text{cm}^3 = 0.72885 \text{ Kg.}$$

el peso del conductor por metro con todo y hielo es:

$$P_C = 0.72885 + 0.913 = 1.642 \text{ Kg.}$$

para conocer la fuerza ejercida sobre el conductor por el viento:



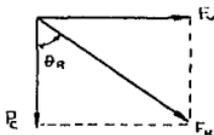
el área expuesta del cable a la acción del viento con todo y hielo es:

$$A = (0.0332)(1.0) = 0.0332 \text{ m}^2$$

conocida la presión del viento y el área sobre la que actúa puede conocerse la fuerza del viento:

$$F_v = 0.0332 \text{ m}^2 \times 40 \text{ Kg/m}^2 = 1.328 \text{ Kg.}$$

el triángulo de fuerzas es:



$$F_R = \sqrt{(1.328)^2 + (1.642)^2}$$

$$F_R = 2.112 \text{ Kg.}$$

$$\theta_R = \tan^{-1} 1.328/1.642$$

$$\theta_R = 38.96^\circ$$

para la flecha, aplicando la fórmula de la parábola y con

$$H = T_m:$$

$$f = 2.112(200)^2/8(2076) = 5.09 \text{ m.}$$

como puede observarse en este ejemplo, aunque en condiciones climáticas con frío intenso la flecha es muy grande debido a la acción del viento y el hielo, no obstante que a bajas temperaturas el cable tiende a contraerse.

5.6 VARIACION DE LA FLECHA Y LA TENSION POR TEMPERATURA.

Cuando la temperatura cambia y el viento modera su velocidad, la tirantez de los conductores varia ampliamente porque se dilatan ó encogen, y se alargan ó contraen por efecto térmico y elástico. Como la longitud influye en la flecha, la tensión cambia. Por otra parte puede ocurrir que la carga del cable varie por depósitos de hielo y como consecuencia la tensión mecánica del cable y la flecha variarán.

El cálculo de la nueva tensión mecánica sólo puede ser efectuada con ecuaciones de tercer grado. A continuación se obtiene la ecuación de tercer grado suponiendo que la tensión de los apoyos es igual a la tensión horizontal y aplicando las fórmulas de la parábola.

Suponiendo las condiciones iniciales p_0, θ_0, T_0, L_0 y las condiciones finales p_1, θ_1, T_1, L_1 ; donde p es peso por unidad de longitud, θ la temperatura del cable, T la tensión mecánica del cable y L la longitud del cable.

La diferencia de longitud está dada por:

$$\Delta L = L_1 - L_0 = d + p_1^2 d^3 / 24 T_1^2 - (d + p_0^2 d^3 / 24 T_0^2)$$

Simplificando:

$$\Delta L = d^3/24(p_1^2/T_1^2 - p_0^2/T_0^2) \dots \dots \dots (1)$$

ésta diferencia de longitud se debe a la variación de la temperatura y la tensión mecánica, ambas combinadas.

La variación de longitud debida a la variación de temperatura está dada por:

$$\Delta L_{\theta} = L_0 \alpha (\theta_1 - \theta_0)$$

donde α es el coeficiente de dilatación lineal.

La variación de la longitud debido a la variación de la tensión mecánica está dada por:

$$\Delta L_T = L_0 \times T_1 - T_0 / EA$$

donde E es el módulo de elasticidad y A el área de la sección recta del cable, conociéndose la expresión como Ley de Hooke.

Como $\Delta L = \Delta L_{\theta} + \Delta L_T$ se tiene:

$$\Delta L = L_0 \alpha (\theta_1 - \theta_0) + L_0 \times T_1 - T_0 / EA \dots \dots \dots (2)$$

Iguando (1) y (2):

$$d^3/24(p_1^2/T_1^2 - p_0^2/T_0^2) = L_0[\alpha(\theta_1 - \theta_0) + T_1 - T_0/EA]$$

Si se considera que la longitud inicial del cable es igual a la distancia entre apoyos; $L_0 = d$, se tiene:

$$d^2/24(p_1^2/T_1^2 - p_0^2/T_0^2) = \alpha(\theta_1 - \theta_0) + T_1 - T_0/EA$$

$$\alpha(\theta_1 - \theta_0) + T_1 - T_0/EA + d^2 p_0^2/24T_0^2 - d^2 p_1^2/24T_1^2 = 0$$

Multiplicando por $T_1^2 EA$ y ordenando términos nos queda:

$$T_1^3 + [d^2 p_0^2 EA/24T_0^2 + EA(\theta_1 - \theta_0) - T_0]T_1^2 - d^2 p_1^2 EA/24 = 0$$

Y la tensión mecánica del cable se obtiene resolviendo la ecuación de tercer grado. Para las flechas se aplican las fórmulas de la parábola para las condiciones iniciales y finales:

5.7 ESFUERZOS EN LOS SOPORTES.

Los esfuerzos a que se ven sometidas las estructuras de soporte que para el caso de líneas de transmisión son en su mayoría torres metálicas pueden ser: verticales, horizontales longitudinales, horizontales transversales, de torsión y de flexión.

Los esfuerzos verticales provienen del peso de los conductores, aisladores, mordazas y de la nieve que se acumula en ellos en algunas regiones del norte; también provienen del peso de cuerpos caídos sobre la línea y de operarios que trabajan suspendidos de los conductores.

Aunque el viento sople diagonalmente en algunas barrancas, no se considera esfuerzo vertical. Los esfuerzos horizontales longitudinales provienen de: diferencia de flechas en los conductores ó en el número ó calibre de ellos; diferencia de claros con igual flecha; ruptura de uno ó varios de los conductores; diferencia de cargas de uno y otro lado.

Los esfuerzos horizontales transversales son causados por el viento y por el cambio de dirección de la línea. Para superficies cilíndricas de postes ó estructuras y conductores se considera una presión no menor de 39 Kg/m² sobre el área proyectada. Cuando la estructura tiene superficies planas se considera una presión no menor de 60 Kg/m² con el área proyectada sobre un plano normal a la dirección del viento. Para los soportes se recomienda calcular el empuje del viento con el área de una cara y aumentando 50% para incluir la cara opuesta. Cuando la línea cambia de dirección hay que sumar la componente transversal de las fuerzas ejercidas por los cables.

Los esfuerzos de torsión provienen del desequilibrio en los hilos de un lado de la cruceta, respecto a los del otro lado, y que tienden a hacer girar la cruceta y la estruc-

tura en un plano horizontal. Los esfuerzos de torsión se transmiten a la base y deben ser resistidos por el cimiento de las piernas de la torre.

Los esfuerzos de flexión son causados por cargas verticales excéntricas y provienen del peso de operarios subidos en el extremo de las crucetas en un sólo lado de la torre, también provienen de las cadenas de aisladores y conductores durante su instalación antes de quedar compensados por las cadenas y conductores del otro lado. Las cargas excéntricas producen momentos flexores que el apoyo debe resistir como si fueran fuerzas horizontales transversales.

5.8 PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCION.

Durante el proyecto de una línea es necesario un trabajo completo de reconocimiento general de la región y estudio de las rutas más convenientes, empleando fotografías aéreas del lugar, celebrar convenios de venta ó permiso de paso con sus propietarios, levantamiento topográfico detallado, nivelación de la ruta escogida para la línea y la elaboración de los siguientes planos:

1) PLANO DE CONJUNTO. En donde se indican los aspectos generales como la localización geográfica de la línea, conexión a subestaciones, interconexiones, tensión eléctrica, tipo y calibre de conductor, etc.

2) PLANOS DE PLANTA. En donde se indican la línea en toda su longitud con el kilometraje sucesivo, puntos terminales, tipo de estructuras, localización, altura, cimentación, derecho de vía, irregularidades del terreno, etc.

3) PLANOS DE PERFIL. En donde se indican la línea en toda su longitud con el kilometraje sucesivo, puntos terminales, características principales de estructuras y aspectos topográficos sobresalientes como son: desniveles, barrancos, cruzamientos, vías de ferrocarril, etc.

4) PLANOS DE CRUZAMIENTO CON CARRETERAS Y VIAS FERREAS. En donde se indica en detalle los puntos de cruzamiento con vías de ferrocarril y carreteras.

La localización de los soportes debe ser escogida para que se cumplan tres requisitos: igual altura de soportes sobre el suelo en todas partes, igual distancia mínima entre los conductores y el suelo y por último, igual separación entre los conductores desalojados por el viento; todo referido a la flecha máxima.

Una vez reconocido el terreno como propio para la sustentación de los soportes se procede a limpiar el espacio que forma el derecho de vía para librar a la línea de cualquier interferencia, así como la de facilitar el paso a las máquinas usadas durante la construcción como son: excavadoras, tractores, grúas, etc.

La excavación para las patas de las torres y los postes es obra, casi siempre, de una máquina perforadora montada en un camión ó una del tipo oruga con ayuda de otras máquinas especiales para caminos. Cuando el terreno es muy inclinado conviene proyectar las torres de manera que admitan extensiones en dos de las piernas con objeto de evitar una excavación demasiado profunda para las otras dos en la parte más alta del terreno.

La erección de los soportes se efectúa de acuerdo con su tipo y tamaño y las posibilidades del equipo de construcción. Cuando se trata de postes, conviene colocar los aisladores de alfiler en las crucetas y sujetar éstas al poste antes de levantarlo por medio de una grúa montada en un camión, la cuál coloca el poste en su sitio con facilidad y lo sostiene mientras se rellena el espacio libre del agujero con piedras, tierra, etc.

Las torres rígidas pequeñas pueden ser armadas ó soldadas en posición horizontal con las crucetas sin aisladores y levantadas después con una grúa hasta quedar con las patas dentro de las excavaciones. Las torres son armadas de abajo hacia arriba a partir del cuerpo inferior, el cual es armado en posición horizontal y levantado ó girado hasta caer en las excavaciones, el resto es subido

pieza por pieza ó en fracciones por una grúa automotora de pluma extensible y atornillado ó soldado en el lugar que le corresponde; en algunas zonas montañosas de difícil acceso a vehiculos se emplean helicópteros tipo "Puma" para subir las piezas con las que se arman las torres.

Los aisladores de suspensión son colocados en su sitio después de la erección de las torres, formando cadenas completas que son levantadas con poleas ó malacate y listas para recibir los conductores. Se emplean aisladores generalmente de 254 x 146 mm con carga de ruptura normal de 6800 Kg y con el siguiente número de discos: uno por cada 15 hasta 45 Kv, uno por cada 14 hasta 154 Kv y uno por cada 12 hasta 287 Kv, si la cadena es horizontal se añade uno ó dos discos.

Los cables de transmisión y guarda no deben ser arrastrados por el suelo, particularmente en terrenos pedregosos, sino desenrollados de los carretes de fábrica montándolos en una armazón especial provista de ruedas más grandes que las tapas del carrete, y tirando de la armazón a lo largo de la ruta. También es conveniente montar los carretes sobre soportes fijos que les permiten girar y ti-

rar del extremo del conductor por medio de cuerdas ó cables de acero que corren sobre poleas suspendidas de las crucetas en varias torres consecutivas y que se enrollen en un malacate, con el cual se da después a los conductores la tensión y la flecha que les correspondan, según la temperatura y presión del viento en ese instante.

Puede intercalarse un dinamómetro entre el malacate y el conductor y se procede a templar hasta obtener la lectura justa, entonces se envían órdenes por radio transmisor a las diferentes cuadrillas montadas en las crucetas para que sujeten al conductor en las mordazas de las cadenas. No habiendo fricción apreciable en las poleas, la tensión del conductor en los claros sucesivos debe ser la misma.

Una vez sujetos los conductores en sus mordazas se procede a colocar los aditamentos que hayan sido incluidos en el proyecto como los aros de flameo, protectores de tubo, etc.

También se construyen y conectan las tierras de la torre, usando generalmente electrodos en forma de varillas

de Copperweld de 16 mm de diámetro con longitud variable según la resistividad del terreno y Counterpoises (Contra-antenas) de cable de cobre desnudo de calibre 2/0 à 4/0 de 7 hilos unidos por conectores.

Los cables de guarda son tratados en forma semejante a los de transmisión y se usan cables de 19 mm con cargas de ruptura de 11900, 18500 y 26500 Kg. de las clases Siemens-Martin, H.S. y E.H.S, respectivamente. También se emplean cables de 22 mm con cargas de ruptura de 16300, 23400 y 36200 Kg en el mismo orden.

Los empalmes de conductores pueden ser hechos con conectores bajo la presión de una prensa hidráulica portátil, con resultados excelentes respecto a resistencia mecánica y óhmica.

5.9 CARACTERISTICAS DEL PROYECTO.

Fundamentalmente, el proyecto de los sistemas de transmisión consiste en la selección de las líneas y equipos necesarios para suministrar la potencia deseada, con la calidad del servicio requerida, con el mínimo costo total anual; al mismo tiempo el sistema debe ser suscepti-

ble de ampliaciones con un mínimo de alteraciones sobre las condiciones existentes.

El proyecto eléctrico comprende los siguientes puntos:

1. Elección del voltaje.
2. Selección de los conductores.
3. Pérdidas.
4. Efecto corona.
5. Regulación del voltaje.
6. Estabilidad del sistema.
7. Protección del sistema:
 - a) Función de los interruptores.
 - b) Disposición de los interruptores.
 - c) Sistema de relevadores.
 - d) Coordinación del aislamiento.
 - e) Apartarrayos
 - f) Puesta a tierra del neutro.
 - g) Tomas de tierra.
 - h) Conductores aéreos de tierra.
 - i) Conductores de contrapeso.

El proyecto mecánico comprende:

1. Cálculo de flechas y esfuerzos.
2. Composición del conductor.
3. Separación entre conductores.
4. Clase y tipo de aisladores.
5. Elección de los accesorios y herrajes para los conductores.

El proyecto de estructuras de apoyo comprende:

1. Elección del tipo de apoyos a emplear.
2. Cálculo de los esfuerzos.
3. Cimentaciones.
4. Tirantes ó vientos y anclajes.

Características varias del proyecto son:

1. Trazado de la línea.
2. Adquisición del derecho de vía.
3. Perfiles.
4. Emplazamiento de las estructuras de apoyo.
5. Coordinación entre emplazamiento de la línea y cálculos eléctricos.
6. Medios de acceso ó comunicación.

CONCLUSIONES.

CONCLUSIONES

Después de haber desarrollado el presente trabajo de tesis se llega a la conclusión de que el diseño de las líneas de transmisión no es nada sencillo, pues intervienen diversos factores que no están relacionados únicamente con los parámetros de las líneas; dichos factores se deben principalmente a las condiciones del medio ambiente en donde se instalarán las líneas y en donde hay que considerar normas internacionales y métodos estadísticos con el fin de tener una línea que sea rentable y asegure la continuidad y seguridad en el suministro.

Además, el diseño y la construcción de las líneas de transmisión aéreas es multidisciplinario y en él intervienen la probabilidad y estadística, mecánica, meteorología, topografía, economía, administración, aspectos jurídicos, laborales, etc.

Aunque el diseño no es fácil se cuenta con el recurso de que las empresas encargadas de la transmisión de energía eléctrica poseen bastante información sobre aspectos de normalización y normas internacionales, además de profesionales especializados y equipos de cómputo, por lo que en el desarrollo de un proyecto cuentan con todos los recursos para disminuir la carga de trabajo y facilitar sus actividades.

BIBLIOGRAFIA.

BIBLIOGRAFIA:

1. Enriquez Harper Gilberto. Lineas de Transmision y Redes de Distribucion de Potencia Eléctrica. Volumen 1 y 2. Limusa México. 1980.
2. Pansini J. Anthony. Transporte y Distribucion de la Energia Eléctrica. Tomo 1. Editorial Glen S.A. Buenos Aires Argentina. 1975.
3. L. Dawes Chester. Electricidad Industrial. Tomo 2. "Corriente Alterna". Editorial Revertè. Barcelona. 1975.
4. E. Knowlton Archer, E. M. Shoop R. Manual "Standard" del Ingeniero Electricista. Tomo 2. Editorial Labor. Barcelona. 1967.
5. Wildt Theodore. Tecnologia de los Sistemas Eléctricos de Potencia. Editorial Hispano-europea. Barcelona. 1983.
6. Raúl Martín José. Diseño de Subestaciones Eléctricas. McGraw-Hill. México. 1987.

7. Enriquez Harper Gilberto. Técnica de las Altas Tensiones. Volumen 1 y 2. Limusa. México. 1980-83.
8. Skrotzki G. A. Bernhardt. Electric Transmission and Distribution. McGraw-Hill. U.S.A. 1954.
9. L. Dawes Chester. Tratado de Electricidad. Tomo 2. "Corriente Alterna". Editorial G. Gili. México. 1989.
10. Gunen Turan. Electric Power Transmission System Engineering Analysis and Design. John Wiley & Sons, Inc. U.S.A. 1988.
11. Enriquez Harper Gilberto. Introducción al Análisis de los Sistemas Eléctricos de Potencia. Limusa. México. 1982.
12. Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Corp. Electrical Transmission and Distribution Reference Book. Westinghouse Electric Corp. Pittsburgh Pennsylvania. 1964.

13. Viqueira Landa Jacinto. Redes Eléctricas. Tomos 1 y 2. Representaciones y Servicios de Ingeniería. México. 1986.
14. Enriquez Harper Gilberto. Fundamentos de Protección de Sistemas Eléctricos por Relevadores. Limusa. México. 1981.
15. Valkenburg Van, Nooger & Neville Inc. Electricidad Básica. Volúmenes 1,2 y 3. C.E.C.S.A. México. 1983.
16. Luca Marin Carlos. Lineas e Instalaciones Eléctricas. Representaciones y Servicios de Ingeniería. México. 1972.
17. Valkenburg Van, Nooger & Neville Inc. Electricidad Industrial Básica. Volumen 1. C.E.C.S.A. México. 1986.
18. D. Stevenson Jr. William. Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia. McGraw-Hill. México. 1986.