



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA

UNIDAD PROFESIONAL "ADOLFO LÓPEZ MATEOS"
ZACATENCO

**"PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN
CONTRA FLAMEO INVERSO POR EFECTO DE
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS"**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTAN:

BÁEZ ESQUIVEL JUVENAL

SÁNCHEZ ANGELES ABRAHAM

ASESORES:

ING. ANASTASIO ONTIVEROS ORTEGA

ING. ERNESTO ADOLFO NIÑO SOLIS

CDMX, OCTUBRE 2017



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL "ADOLFO LÓPEZ MATEOS"**

TEMA DE TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRICISTA
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN TESIS COLECTIVA Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL
DEBERA (N) DESARROLLAR C. JUVENAL BAEZ ESQUIVEL
C. ABRAHAM SANCHEZ ANGELES

**"PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CONTRA FLAMEO INVERSO POR EFECTO DE
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS"**

EL DESARROLLO DE ESTE PROYECTO TIENE COMO PROPÓSITO DAR A CONOCER LA IMPORTANCIA DE LA PROTECCIÓN CON LA QUE DEBE CONTAR UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN CONTRA LAS SOBRETENSIONES POR EFECTO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS Y EVITAR SALIDAS DEL SISTEMA MEDIANTE EL BLINDAJE Y LA RED DE TIERRA CON BASE EN MÉTODOS ANALÍTICOS Y NORMATIVOS.

- ❖ INTRODUCCIÓN
- ❖ LÍNEAS DE TRANSMISIÓN
- ❖ FLAMEO INVERSO
- ❖ SOBRETENSIONES POR RAYO EN LAS LÍNEAS
- ❖ BLINDAJE EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN
- ❖ MEJORAMIENTO DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO
- ❖ CONCLUSIONES

CIUDAD DE MÉXICO, A 18 DE OCTUBRE DE 2017.

ASESORES


ING. ANASTACIO ONTIVEROS
ORTEGA


ING. ERNESTO ADOLFO NIÑO
SOLÍS


ING. JUAN DE JESÚS NERI ESCUTIA GÓMEZ
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA



Autorización de uso de obra

Instituto Politécnico Nacional
Presente

Bajo protesta de decir verdad a los que suscriben **Juvenal Báez Esquivel** y **Abraham Sánchez Angeles**, manifestamos ser autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada "**Protección de líneas de transmisión contra flameo inverso por efecto de descargas atmosféricas**", en adelante "**La Tesis**" y de la cual se adjunta copia, un impreso y un cd, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo al **Instituto Politécnico Nacional**, en adelante **El IPN**, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales o en cualquier otro medio para apoyar futuros trabajos relacionados con el tema de "**La Tesis**" por un periodo de 5 años contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a **El IPN** de su terminación.

En virtud de lo anterior **El IPN** deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de "**La Tesis**".

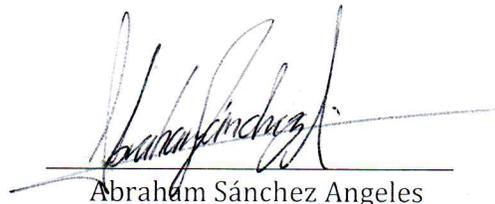
Adicionalmente, y en calidad de autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de "**La Tesis**", manifestamos que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de "**La Tesis**", por lo que deslindamos de toda responsabilidad a **El IPN** en caso de que el contenido de "**La Tesis**" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumimos las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México a 18 de Octubre de 2017

Atentamente



Juvenal Báez Esquivel



Abraham Sánchez Angeles

AGRADECIMIENTOS.

Sánchez Ángeles Abraham

A mis padres...

...quienes en cada etapa de mi vida han sabido orientarme para lograr mis objetivos, dándome útiles consejos y enseñanzas. Quienes, pese a mis fracasos y logros, tienen las palabras exactas para mantenerme firme.

A mis hermanos...

...por su comprensión, motivación, entusiasmo y apoyo incondicional.

A Nicolás y Silvia...

...por su ejemplo de profesionalidad, ustedes son parte esencial en este gran logro y, sobretodo, parte esencial en mi vida.

A Marlen...

...por el apoyo incondicional, por tu cariño, por nuestro futuro.

A mis asesores de tesis...

...quienes con su gran experiencia, dedicación, entusiasmo y paciencia aportaron en gran medida conocimientos para la elaboración de este trabajo.

A ustedes debo lo que soy...

... y deberé ...

... lo que seré.

Báez Esquivel Juvenal.

A mis padres...

...que me han apoyado durante todos estos años sin esperar nada a cambio, sin importar las veces que he tropezado ustedes continúan apoyándome y motivándome, ustedes son quienes me han impulsado a lograr mis objetivos.

A mis hermanos...

...porque siempre han estado ahí cuando los necesito y sé que cuento con ustedes en todo momento.

A mis asesores de tesis...

...ustedes con sus conocimientos y experiencia hicieron posible la realización de este proyecto.

Contenido

OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
JUSTIFICACIÓN	5
ANTECEDENTES HISTÓRICOS	6
<i>Internacionales</i>	6
CAPÍTULO I LÍNEAS DE TRASMISIÓN	8
<i>Línea de transmisión corta</i>	9
<i>Línea de transmisión de longitud media</i>	10
<i>Líneas de transmisión largas</i>	11
CARACTERÍSTICAS DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN	13
<i>Resistencia</i>	14
<i>Inductancia</i>	15
<i>Capacitancia</i>	15
<i>Conductancia</i>	17
IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA	18
TIPOS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	18
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE CABLE ABIERTO	19
LONGITUD ELÉCTRICA DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN	20
PÉRDIDAS EN LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN	20
ESTRUCTURAS NORMALIZADAS PARA LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN	21
TORRES DE ACERO	22
<i>Torres Autosoportadas por Celosías</i>	23
<i>Torres Autosoportadas Tubulares</i>	25
<i>Torres con Retenidas</i>	28
CAPITULO II FLAMEO INVERSO	30
ALTERNATIVAS PARA LA CORRECCIÓN DEL FENÓMENO DE FLAMEO INVERSO	32
HILO DE GUARDA	33
ÁNGULO DE BLINDAJE	37
MÉTODOS DE UBICACIÓN DEL CABLE DE GUARDA	38
<i>Método Charles</i>	38
<i>Método Wagner y Mac Cann</i>	40
<i>Método Schwaiger</i>	42
PUESTA A TIERRA	44
FUNCIONALIDAD DE LOS SISTEMAS DE TIERRAS	44
<i>Sistema de tierra de trabajo</i>	45
COMPONENTES DE SISTEMAS A TIERRAS	45
<i>Dispersor o electrodo</i>	45
<i>El conductor de tierra</i>	45
<i>Coletores eventuales de tierra</i>	45
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES PARA LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA	46
<i>Corriente de tierra I</i>	46
<i>Tensión de tierra V</i>	46
<i>Temperatura</i>	47
<i>Humedad</i>	47
<i>Resistividad</i>	48
METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA DESCARGA RETROACTIVA (BACK-FLASHOVER)	50
CAPITULO III SOBRETENSIONES POR RAYO EN LAS LÍNEAS	54

TIPOS DE SOBRETENSIONES.....	54
<i>Sobretensiones del tipo internas.</i>	56
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	57
LA FORMACIÓN DEL RAYO.....	60
TEORÍAS DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	62
<i>El gradiente eléctrico.</i>	62
<i>Teoría de Elster y Geitel.</i>	63
<i>Teoría de los Cristales de hielo.</i>	64
<i>Teoría de Simpson.</i>	66
CAPITULO IV BLINDAJE EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	69
CABLES DE GUARDA.	69
DESCARGAS DIRECTAS A LOS CABLES CONDUCTORES.	69
DESCARGAS DIRECTAS A LA TORRE DE TRANSMISIÓN.	74
DESCARGAS A LOS CABLES DE GUARDA.	75
FACTOR DE ACOPLAMIENTO PARA LÍNEAS CON UN CABLE DE GUARDA.	78
EL FACTOR DE ACOPLAMIENTO PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CON DOS CABLES DE GUARDA.	80
CABLE DE GUARDA TIPO OPGW.....	85
APARTARRAYOS.....	93
<i>Apartarrayos de óxido metálico.</i>	96
SELECCIÓN DE APARTARRAYOS.....	97
ABSORCIÓN DE ENERGÍA.	99
ESPECIFICACIÓN DE UN APARTARRAYOS.....	99
CAPITULO V MEJORAMIENTO DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO	101
<i>Cables de contrapeso</i>	101
FIGURA 5.2 ARREGLO DE DISPERSORES.....	103
<i>Varillas de contrapeso.</i>	103
<i>Combinación de cables y varilla de contrapeso.</i>	104
<i>Aplicación de sales y carbón.</i>	104
<i>Adición de bentonita.</i>	104
CÁLCULO DE LA RESISTENCIA AL PIE DE LA TORRE.....	105
CONEXIÓN POR MEDIO DE VARILLAS.	105
DOS VARILLAS.....	106
TRES VARILLAS	106
CUATRO VARILLAS.....	106
CONEXIÓN POR MEDIO DE CONTRAANTENAS.....	107
IMPORTANCIA DE UNA RED DE TIERRA.....	108
CONCLUSION.....	110
ANEXOS.....	111
GLOSARIO DE TÉRMINOS	117
BIBLIOGRAFIA.....	119

Objetivo General.

Conocer la importancia de la protección con la que debe contar una Línea de Transmisión contra flameo inverso para evitar sobretensiones por efecto de descargas atmosféricas y evitar salidas del sistema mediante el blindaje y la red de tierra, con base en métodos analíticos y normativos.



Objetivos Específicos.

- Facilitar la comprensión de las sobretensiones por efecto de descargas atmosféricas en las Líneas de Transmisión.
- Brindar una protección adecuada, tomando en cuenta los diferentes factores que influyen en la instalación de redes a tierra.
- Reducir la probabilidad de presencia del flameo inverso.
- Explicar el fenómeno de las descargas atmosféricas.
- Proponer medidas de contención para evitar el flameo inverso.

JUSTIFICACIÓN.

Para transmitir energía eléctrica es necesario construir una línea segura y dentro de la normatividad correspondiente. La realización de este proyecto ofrece el beneficio de conocer la adecuada protección de un Sistema Eléctrico de Potencia, en este caso, de las Líneas de Transmisión, lo cual conviene conocer por la variación del clima, puesto que se presentan sobretensiones provocadas por las descargas atmosféricas provocando salidas del sistema, y que pueden dañar el sistema de transmisión de energía eléctrica del país. Así, si se ignoran los aspectos de protección o blindaje en las líneas de transmisión, ocurrirá un deterioro significativo en las mismas, provocando pérdidas millonarias tanto para usuarios como para empresas suministradoras. En estas últimas, se tendrían Sistemas Eléctricos ineficientes e inseguros para su adecuada distribución.

Antecedentes Históricos.

Internacionales.

En 1891, se realizó la primera transmisión de potencia alterna trifásica, esta, se llevo a cabo desde una central hidroeléctrica de 200 kw en Alemania, a una distancia de 170 km, dicha energía se aplicaba a un motor asincrónico trifásico de 75 kw que accionaba a una unidad de bombeo.

Dado que la transmisión de potencia eléctrica a distancia fue difundida hasta el año de 1930, la optimización en el aspecto de la frecuencia no fue tomada como un factor de diseño y cuando, en años posteriores, se comenzó a considerar dicho aspecto, la frecuencia a 60 o 50 Hz era ya de uso estandarizado y difícilmente se cambiaría. Esto debido a que, tanto empresas como usuarios, contaban con sistemas que trabajaban en las frecuencias establecidas desde un principio.

Nacionales.

La primera línea de transmisión en nuestro país fue la de Necaxa-México, que entró en servicio en diciembre de 1905, con una capacidad de 60kV; que aumentó a 85kV cinco años después. Paralelo a este proyecto se desarrolló la línea México-El Oro, con la misma capacidad.

En un inicio las estructuras eran de fabricación extranjera, a lo largo del siglo XX, cada empresa proponía, diseños y analizaba distintas estructuras conforme a sus conveniencias. Uno de los principales proyectos desarrollados en aquél entonces fue la construcción del anillo de 230kV, por la empresa Acero Ecatepec, que se concluyó en 1969. Este proyecto satisfacía y respaldaba las necesidades de energía eléctrica , rodeando la periferia de la Ciudad de México. La falta de normalización de las torres originó una gran variedad de torres distintas en las líneas de transmisión existentes.

Fue hasta principios de la década de los 70's, que Luz y Fuerza del Centro, realizó los primeros esfuerzos en desarrollar una infraestructura propia de fabricación, capaz de asumir

las necesidades de las estructuras de los nuevo proyectos. El primero de los pedidos de fabricación se asignó al Taller de Estructuras Tacuba. En la actualidad, esta producción se concentra en la Fábrica de Estructuras Xochinahuac. Uno de sus primeros y principales trabajos fue la construcción del anillo de 400kV, que inició su construcción en 1974 y concluyó exitosamente en 1985. Esta línea circunda la periferia del área metropolitana de la Ciudad de México y funge como nuevo respaldo para las instalaciones existentes.

Debido al éxito obtenido por la fabricación de este tipo de estructuras dentro de la empresa, fue necesario crear un compendio de torres. Este esfuerzo se concluyó en 1977, que incluía las torres existentes hasta entonces y las proyectadas por el Departamento de Ingeniería Civil.

En la actualidad, debido a requerimientos específicos de los nuevos proyectos, ha sido necesario realizar modificaciones y/o nuevas soluciones a las estructuras originales

Capítulo I

Líneas de Trasmisión

Las líneas de transmisión eléctricas sirven para transportar y distribuir energía eléctrica, se dividen principalmente en dos grandes categorías, líneas de transmisión aéreas y líneas de transmisión subterráneas.

Las líneas de transmisión en México aéreas son vulnerables a los fenómenos atmosféricos que ocurran a lo largo de su trayectoria, uno de estos fenómenos, es el llamado Descarga Retroactiva, el cual se da cuando una descarga atmosférica cae directamente sobre una torre de transmisión, lo que provoca que a lo largo de la torre se tenga una corriente muy elevada la cual siempre deberá de llegar al sistema de tierra de la torre. Si el sistema de tierra está diseñado de una manera correcta, éste debe de ser capaz de soportar la corriente generada por la descarga atmosférica, en caso contrario, el sistema de tierra no será capaz de diseminar ésta corriente, lo cual hará que dicha corriente retorne por el camino que llegó, es decir, la torre.

Este retorno de corriente puede llegar a ser peligroso para el sistema si tenemos en cuenta que los elementos de protección ya recibieron la descarga directamente y no fueron capaces de protegerlo al 100%, por lo que la corriente de retorno tendrá más posibilidades de dañarlo, además, si se toma en cuenta que la descarga retroactiva es de una magnitud mayor a la corriente de rayo original, el peligro de falla se hace mucho mayor. El único valor del que se puede tener control en la torre de transmisión, es el de la resistencia de puesta a tierra, ya que los demás parámetros son constantes puesto que son propios de la misma torre. De ahí la importancia de que este sistema de protección sea bien diseñado y que su valor sea el adecuado para lograr un nivel de protección óptimo.

Para su estudio y de acuerdo a su longitud, las líneas de transmisión se pueden dividir en:

- Cortas:** Con longitud menor a los 80 km.
- Medianas:** Con longitudes entre los 80 y 220 km.
- Largas:** Con longitudes mayores a los 220 km.

Línea de transmisión corta.

Este tipo de líneas cortas no van mas allá de los 80km, y se representa con el circuito equivalente mostrado a continuación:

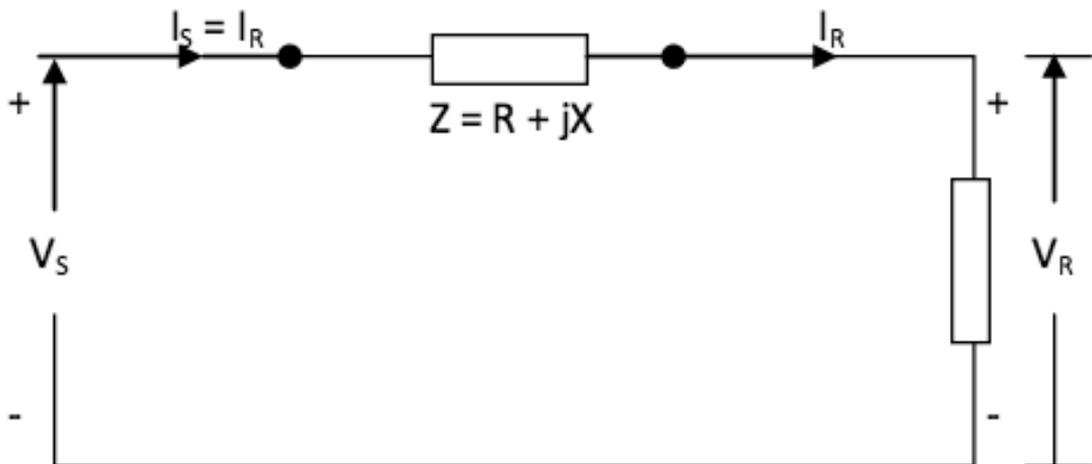


Figura 1.1. Circuito equivalente de una línea corta.

Como este es un circuito simple en serie, la relación entre los voltajes y las corrientes en el extremo transmisor y en el extremo receptor se pueden escribir de manera inmediata como:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

En este tipo de línea corta, si es aérea la conductancia de línea es despreciable al igual que la admitancia en derivación .

Línea de transmisión de longitud media.

Este tipo de línea de transmisión va de los 80km a 220km de longitud; en estas líneas de transmisión no se debe de despreciar la corriente de carga como se hace en las líneas cortas esto debido a la admitancia; pues es de suma importancia concentrar la admitancia de línea en el extremo receptor, como se muestra en la figura:

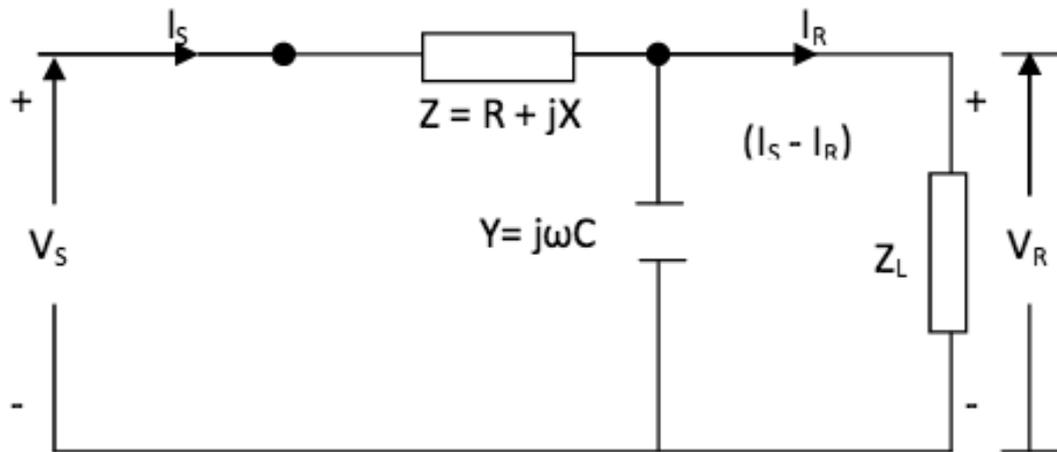


Figura 1.2 Capacitancia localizada en el extremo de la carga para línea de longitud media.

Las ecuaciones de la línea de transmisión se pueden escribir en forma matricial y en la forma de constantes ABCD, casi igual que en la línea de transmisión corta y queda de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + YZ & Z \\ Y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Algo que es de importancia resaltar es que de tanto para las líneas de longitud corta y mediana se pueden obtener mediante parámetros de las líneas concentradas.

Líneas de transmisión largas.

Estas líneas de transmisión tienen longitudes mayores a 220km, para líneas largas una solución más exacta se obtiene considerando el efecto exacto de los parámetros distribuidos uniformemente a través de su longitud.

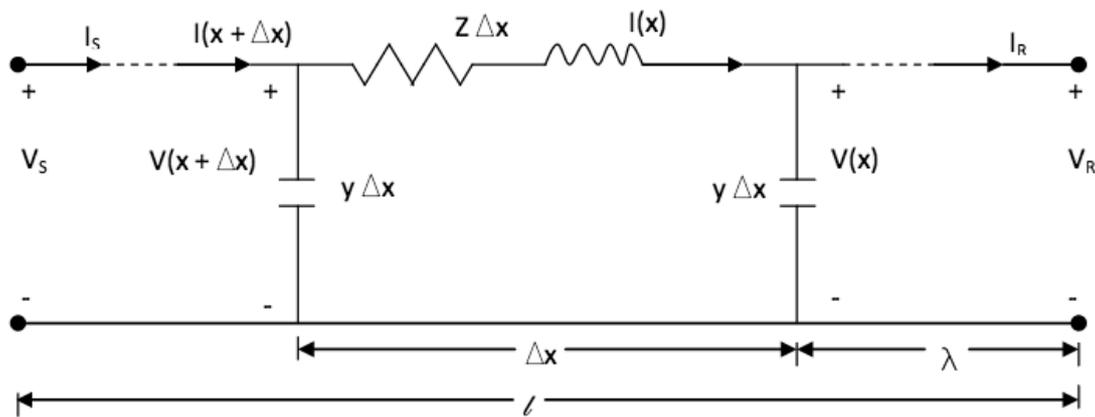


Figura 1.3 Diagrama esquemático de una línea larga.

En las líneas largas se debe de considerar la impedancia serie por unidad que se representa por la letra z (minúscula).

$$z = r + j\omega C \quad (1.3)$$

Al igual que la admitancia en derivación por fase que se representa por una letra y (minúscula) debemos de recordar que “ g ” es de la conductancia.

$$y = g + j\omega C \quad (1.4)$$

Las líneas aéreas están constituidas por conductores en el aire apoyados en estructuras metálicas (torres) y sujetas por medio de aisladores. El aislamiento entre conductores lo proporciona el aire y el aislamiento entre los conductores y tierra se obtiene por medio de las cadenas de los aisladores.

Desde el punto de vista del proyecto de las líneas de transmisión, los principales componentes a considerar son:

- Estructuras
- Conductores
- Aislamientos y herrajes

Las estructuras metálicas que soportan las líneas serán tratadas en páginas posteriores, mientras que para conductores, la CFE emplea normalmente conductores ACSR que están compuestos de un alma de acero que tiene principalmente funciones mecánicas y externamente una o más capas de hilos de aluminio devanadas en forma de espiral. Los tipos y calibres de conductores normalmente usados en las líneas de transmisión por CFE son los siguientes:

- Para 400 KV: ACSR 1113 KCM
- Para 230 KV: ACSR 900 KCM, ACSR 795 KCM, ACSR 1113 KCM
- Para 115 KV: ACSR 477 KCM, ACSR 795 KCM

Desde el punto de vista eléctrico, los factores que se deben considerar para la selección de un determinado tipo de conductor son:

- Capacidad de conducción de corriente
- Máxima caída de tensión permisible
- Límite económico de pérdidas
- Límite de pérdidas por efecto corona

- Nivel máximo permisible de ruido

Como estudio de planeación asociado a las condiciones de operación que presentará la línea, se puede hacer un estudio de capacidad en dicha línea de transmisión.

La capacidad se expresa por medio de curvas que relacionan la longitud de la línea con la carga de la misma, el término capacidad no se refiere específicamente a las propiedades físicas del conductor, por ejemplo, el límite térmico, más bien se analizan ciertos criterios que definen esta capacidad y que básicamente son los siguientes:

- El límite térmico permisible
- La máxima caída de voltaje permisible en la línea
- El margen de estabilidad en estado permanente

Por otra parte, los aisladores representan el punto mecánico de soporte de los conductores en la estructura y cumplen también con la función de proporcionar el aislamiento entre conductor y tierra dando la distancia eléctrica requerida en el aire y siendo estos de vidrio y porcelana.

Los herrajes aportan la seguridad en la operación de una línea, dependiendo en forma particular de la confiabilidad que deben tener los elementos de unión de los conductores, para la fijación de los conductores a los aisladores y para la fijación de estos últimos a la torre.

Características de una línea de transmisión.

Para el desarrollo del diseño de una línea de transmisión se deben considerar aspectos complementarios como lo son el derecho de vía, el levantamiento topográfico, normas, reglamentos y leyes, planos y las finanzas; esto debido a que para transmitir la energía eléctrica es necesario construir una línea la cual deba de estar alojada dentro de estos complementos. La Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2005 relativa a las instalaciones eléctricas destinadas al uso y suministro de la energía eléctrica publicada en el

Diario Oficial de la Federación, define que:

“Derecho de vía: Es una franja de terreno que se ubica a lo largo de cada línea, cuyo eje longitudinal coincide con trazo topográfico de la línea. Su dimensión transversal varía de acuerdo con el tipo de estructuras, con la magnitud y desplazamiento lateral de la flecha y con la tensión eléctrica de operación.”

Las características de una línea de transmisión se determinan por sus propiedades eléctricas, como la conductancia y la constante dieléctrica del aislante, y sus propiedades físicas, como el diámetro del cable y los espaciamientos entre conductores.

Estas propiedades, a su vez, determinan las constantes eléctricas primarias:

- Resistencia.
- Inductancia
- Capacitancia en derivación
- Conductancia en derivación

Resistencia.

La resistencia en c.d. de un conductor sólido y redondo a una temperatura está dada por:

$$R_{cd} = \frac{\rho l}{A} \quad (1.5)$$

Donde:

ρ = Resistividad

l = Longitud del conductor

A = Área de la sección transversal

En el caso de c.a. la distribución de corriente no es uniforme sobre la sección transversal. La resistencia del conductor incrementa conforme se eleva la temperatura en el.

$$R_2 = R_1 \frac{T + t_2}{T + t_1} \quad (1.6)$$

R_1 y R_2 son las resistencias del conductor en t_1 y t_2 y estas están medidas en Celsius. T es la constante de temperatura que depende del material conductor (por ejemplo la temperatura de aluminio, $T_{Al} = 228^\circ C$).

Inductancia.

Se da por la misma corriente que circula por el conductor pues produce campos magnéticos alrededor del conductor y es el parámetro de línea más dominante en los sistemas eléctricos de potencia.

Para materiales no magnéticos la inductancia (L) es la relación de su flujo magnético total de acoplamiento entre la corriente

$$L = \frac{\lambda}{I} \quad (1.7)$$

Donde:

λ = Flujo de acoplamiento (weber-vueltas)

I = Corriente que circula por el conductor

La corriente que lleva un conductor produce un campo magnético alrededor del mismo, la dirección del campo magnético se determina por la regla de la mano derecha.

La inductancia (L) del conductor se define como la suma de las contribuciones de flujo interno y externo del conductor.

Capacitancia.

Es el parámetro que modela el campo eléctrico que se establece entre los conductores de la línea y entre los conductores y tierra debido a la carga en dichos conductores.

Se presenta el método general para determinar capacitancias para una línea con

cualquier número de conductores, incluyendo hilos de guarda y considerando el efecto de tierra.

En la figura siguiente se muestra el esquema de cargas-imágenes, para considerar el efecto de tierra en el cálculo de capacitancias. Con dicho método, los voltajes involucrados se determinan mediante la ecuación:

$$V_i = \frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{j=1}^n q_j \ln \frac{H_{ij}}{D_{ij}} \quad (1.8)$$

Donde:

H_{ij} = Distancia entre el conductor i y la imagen del conductor j . Si $i = j$, H_{ij} es la distancia del conductor i a su propia imagen.

D_{ij} = Distancia entre los conductores i y j . Si $i = j$, D_{ij} es el radio de conductor i .

q_j = carga de conductor j .

Simplificando:

$$Y = j\omega C \quad (1.9)$$

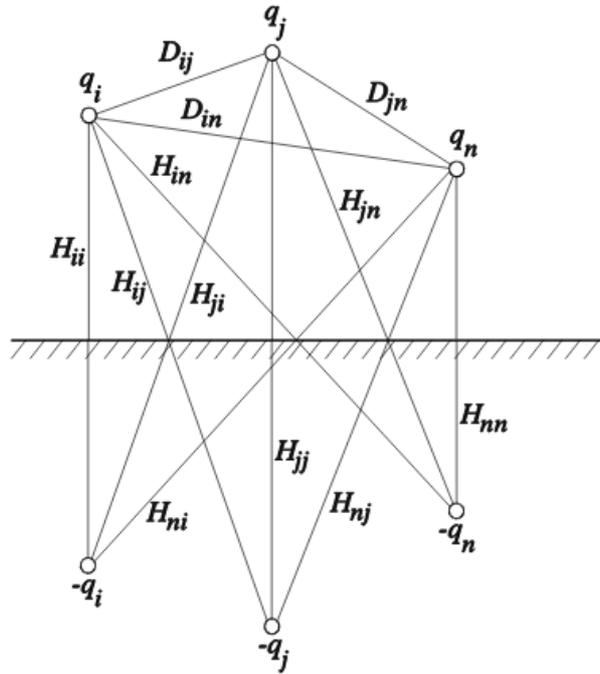


Figura. 1.4 Conductores con sus respectivas imágenes, representados por cargas.

Conductancia.

El material que forma un conductor eléctrico es cualquier sustancia que pueda conducir una corriente eléctrica cuando este conductor está sujeto a una diferencia de potencial entre sus extremos.

Esta propiedad se llama conductividad o conductancia (G) que es una medida que determina cual es la facilidad de un material para la conducción de una corriente eléctrica. Y numéricamente es inversa a la resistencia:

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.10)$$

La conductancia es también el resultado de la fuga sobre la superficie de los aisladores, esto quiere decir que se debe a la dispersión por los aislantes de las líneas y a los campos eléctricos del conductor.

La resistencia y la inductancia se presentan a lo largo de la línea, mientras que entre

conductores y tierra ocurren la capacitancia y la conductancia.

Las constantes primarias se distribuyen de manera uniforme a lo largo de la línea, por lo tanto, se les llama comúnmente parámetros distribuidos. Estos parámetros distribuidos se agrupan por una longitud unitaria dada, para formar un modelo eléctrico artificial de la línea.

Las características de una línea de transmisión se llaman constantes secundarias y se determinan con las cuatro constantes primarias.

Impedancia Característica

Cuando se desprecian las pérdidas, es decir, la resistencia en serie, en una línea de transmisión, se obtienen expresiones más sencillas para los parámetros de la línea y por consiguiente los análisis se hacen más sencillos.

La impedancia característica de una línea de transmisión real $Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}}$, es una cantidad compleja expresada en ohms, sin embargo en una línea considerada sin pérdidas, la impedancia característica es una cantidad real pura, es decir, resistiva.

Por lo anterior si una línea se considera sin pérdidas y con una carga igual a su impedancia característica, el flujo de potencia real será igual a $\frac{|V_{nom}|}{Z_C}$, tomando en cuenta que el perfil de voltaje es plano. Dicha potencia se considera como “La cargabilidad de la línea a la impedancia característica” (SIL) (Surge Impedance Loading).

Dependiendo de la longitud de la línea, su capacidad de carga de la misma será desde una fracción de su SIL hasta múltiplos (2 o 3 veces).

Tipos de Líneas de Transmisión.

Para su estudio, las líneas de transmisión se clasifican generalmente como balanceadas. Con líneas balanceadas de dos cables, ambos conductores llevan una corriente; un conductor lleva la señal y el otro es el regreso. Este tipo de transmisión se llama transmisión de señal

diferencial o balanceada.

La señal que se propaga a lo largo del cable se mide como la diferencia de potencial entre los dos cables. Las corrientes que fluyen en direcciones opuestas por un par de cable balanceados se les llaman corriente de circuito metálico.

Las corrientes que fluyen en las mismas direcciones se llaman corrientes longitudinales. Un par de cables balanceados tiene la ventaja que la mayoría de la interferencia por ruido (voltaje de modo común) se induce igualmente en ambos cables, produciendo corrientes longitudinales que se cancelan en la carga.

Cualquier par de cable puede operar en el modo balanceado siempre y cuando ninguno de los dos cables esté con el potencial a tierra, como por ejemplo, el cable coaxial que tiene dos conductores centrales y una cubierta metálica.

La cubierta metálica generalmente se conecta a tierra para evitar interferencia estática al penetrar a los conductores centrales. Con una línea de transmisión desbalanceada, un cable se encuentra en el potencial de tierra, mientras que el otro cable se encuentra en el potencial de la señal.

Este tipo de transmisión se le llama transmisión de señal desbalanceada o de terminación sencilla. Con la transmisión de una señal desbalanceada, el cable de la tierra también puede ser la referencia a otros cables que llevan señales.

Líneas de transmisión de Cable Abierto.

Una línea de transmisión de cable abierto es un conductor paralelo de dos cables. Consiste simplemente de dos cables paralelos, espaciados muy cerca y sólo separado por aire.

Los espaciadores no conductivos se colocan a intervalos periódicos para apoyarse y mantenerse a la distancia entre las constantes entre los conductores. Las distancias entre los dos conductores generalmente están entre 2 y 6 pulgadas.

El dieléctrico es simplemente el aire, entre y alrededor de los conductores en donde se propaga la onda transversal electromagnética. La única ventaja real de este tipo de línea de transmisión de cable abierto es su construcción sencilla. Ya que no hay cubiertas, las pérdidas por radiación son altas y susceptibles a recoger ruido. Por lo tanto, las líneas de transmisión de cable abierto normalmente operan en el modo balanceado.

Longitud Eléctrica de una línea de Transmisión.

La longitud de una línea de transmisión relativa a la longitud de onda que se propaga hacia abajo es una consideración importante, cuando se analiza el comportamiento de una línea de transmisión. A frecuencias bajas, el voltaje a lo largo de la línea permanece relativamente constante. Sin embargo, para frecuencias altas, varias longitudes de onda de la señal pueden estar presentes en la línea al mismo tiempo.

Por lo tanto, el voltaje a lo largo de la línea puede variar de manera apreciable. En consecuencia, la longitud de una línea de transmisión frecuentemente se da en longitudes de onda, en lugar de dimensiones lineales. Los fenómenos de las líneas de transmisión se aplican a las líneas largas.

Pérdidas en la línea de transmisión.

Las líneas de transmisión frecuentemente se consideran totalmente sin pérdidas. Sin embargo, en realidad, hay varias formas en que la potencia se pierde en la línea de transmisión, son:

- Pérdida en el conductor
- Pérdida por radiación por el calentamiento dieléctrico
- Pérdida por acoplamiento
- Descarga luminosa (efecto corona)

Debido a que la corriente fluye a través de una línea de transmisión y la línea de transmisión tiene una resistencia finita, hay una pérdida de potencia inherente e inevitable. Esto a veces se llama pérdida del conductor o pérdida por calentamiento del conductor y es, simplemente, una

perdida por Efecto Joule.

Debido a que la resistencia se distribuye a lo largo de la línea de transmisión, la pérdida por calentamiento del conductor es directamente proporcional a la longitud de la línea. Además, porque la disipación de potencia es directamente proporcional a la corriente, la pérdida del conductor es inversamente proporcional a la impedancia característica.

Para reducir las pérdidas del conductor, simplemente debe acortarse la línea de transmisión, o utilizar un cable de diámetro más grande, debe considerarse que al cambiar el diámetro del cable, también cambia la impedancia característica y en consecuencia, la corriente.

Estructuras Normalizadas para Líneas de Alta Tensión.

La industria en general necesita del diseño de estructuras que por su complejidad y exigencias de operación requieren de un análisis especial que también garantice su buen funcionamiento y bajo costo. Estas acciones implican una fuerte actividad de análisis y diseño estructural. La solución a problemas del análisis y diseño de estructuras se basa fundamentalmente en el desarrollo, elaboración y uso de modelos numéricos y matemáticos que permitan predecir la respuesta de las estructuras y técnicas para optimar los diseños. Así se han desarrollado e implementado metodologías especializadas para optimar el diseño de las estructuras y el análisis de casos específicos. Dichas metodologías y han sido elaboradas por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE).

La Comisión Federal de Electricidad busca garantizar el funcionamiento y disponibilidad de sus estructuras, así como reducir los costos asociados de diseño, fabricación, instalación y mantenimiento, por esta razón, debe apearse a dichos estándares.

Hasta el momento, el IIE ha diseñado 21 torres y se han detallado 14, lo cual implica la elaboración de los planos de taller y montaje, y las listas de materiales para pruebas de prototipos.

En conjunto con la CFE se supervisó la fabricación y el armado de prototipos de cuatro de las torres normalizadas, correspondientes a líneas de transmisión de 115 KV para verificar el ensamble y aplicar pruebas de resistencia mecánica.

La normalización que se llevó a cabo permitirá contar con un número reducido de torres de diseño óptimo que podrán utilizarse en forma segura y económica en el diseño de líneas de transmisión de 115, 230 y 400 KV en cualquier zona del país bajo condiciones climáticas y topográficas diversas.

La posible expansión de líneas en zonas montañosas obliga a tomar medidas para prever la inestabilidad aerodinámica de líneas de transmisión. Una de las inestabilidades que se presentan en los cables de líneas de transmisión es el galopeo, el cual consiste en la aparición de vibraciones importantes de los cables, sobre todo cuando el flujo del viento incide ortogonalmente a la línea.

En relación con el tema de las torres de transmisión, es necesario revisar las normas, por ejemplo sobre condiciones de carga, además de actualizar el mapa de vientos realizado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas y revisar constantemente las condiciones de carga de las torres de transmisión para ver si se requiere algún ajuste en los diseños y así mejorar paulatinamente los diseños de las nuevas líneas que se van requiriendo.

Torres de Acero.

Las torres o estructuras metálicas como se sabe constituyen el soporte mecánico de las líneas de transmisión y económicamente hablando representan la mayor inversión, en México se construyen principalmente de acero o cemento armado para distribución y subestación. En algunos países se pueden encontrar líneas de transmisión de otros materiales como madera.

Por su tipo, pueden ser:

- Torres autoportadas por celosía.
- Torres autoportadas tubulares.
- Torres con retenidas.

Torres Autosoportadas por Celosías.

Las torres autosoportadas constituyen prácticamente la totalidad de las estructuras usadas en líneas de transmisión en alta tensión. Su nombre se debe a que mecánicamente no requieren apoyos adicionales para trabajar como elementos sujetos a los esfuerzos de tensión y compresión debidos a cargas de conductores, aisladores y elementos externos de presión de viento, carga de hielo en algunas regiones, etc., además del tensionado normal para montaje; distancia interpostal (es decir distancia media entre dos torres también conocidas como horizontal).

Clasificación:

- Tipo Suspensión.

- Tipo Tensión.

- Tipo Remate.

- De Transposición.

La mayoría de las líneas de transmisión usadas en CFE son del tipo autosoportadas con celosía de las llamadas de suspensión. Las torres de tensión se aplican en menor número para cambios de dirección, cruzamientos y zonas en donde se requiere obtener una mayor altura de los conductores.

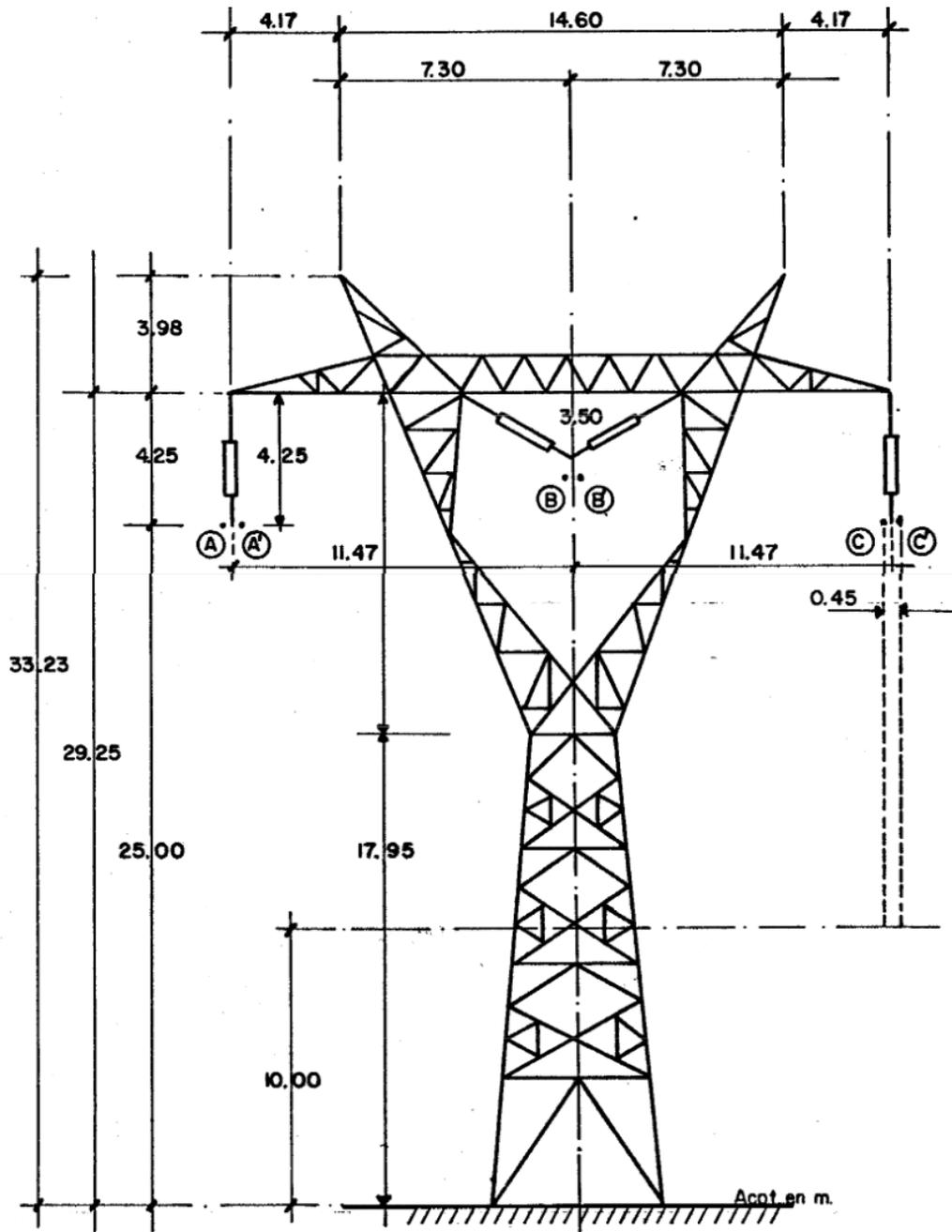


Figura 1.5 Torre Autoportada para 400kV

Las torres de remate se usan en las llegadas o salidas de subestaciones eléctricas y pueden ser de suspensión o de tensión dependiendo del ángulo de llegada o salida a la subestación preferentemente se usan de tipo suspensión.

Las torres de transposición tienen un diseño similar a las de suspensión y se usan para alternar la posición de los conductores de fase de las líneas de transmisión, se aplican pocas en una línea de transmisión y dependen en cierto modo de la longitud de las mismas.

Torres Autosoportadas Tubulares.

Estas también son soportadas en el mismo concepto de las tipo celosía, la diferencia está en que no se construyen como las de celosía con ángulos o perfiles, sino que se usa un tubo de acero, lo que hace que sean más compactas pero también su costo es superior a igualdad de condiciones de operación, son diseñadas para trabajar en suspensión o tensión al igual que las de celosía.

Debido a su alto costo, su uso está restringido a zonas donde se tienen problemas de disponibilidad de terreno para construir la línea y de estética, es decir, se aplican preferentemente en zonas urbanas con diseños compactos en donde se usan aislamientos sintéticos, es decir, un aislamiento no convencional a base de discos de vidrio o porcelana.

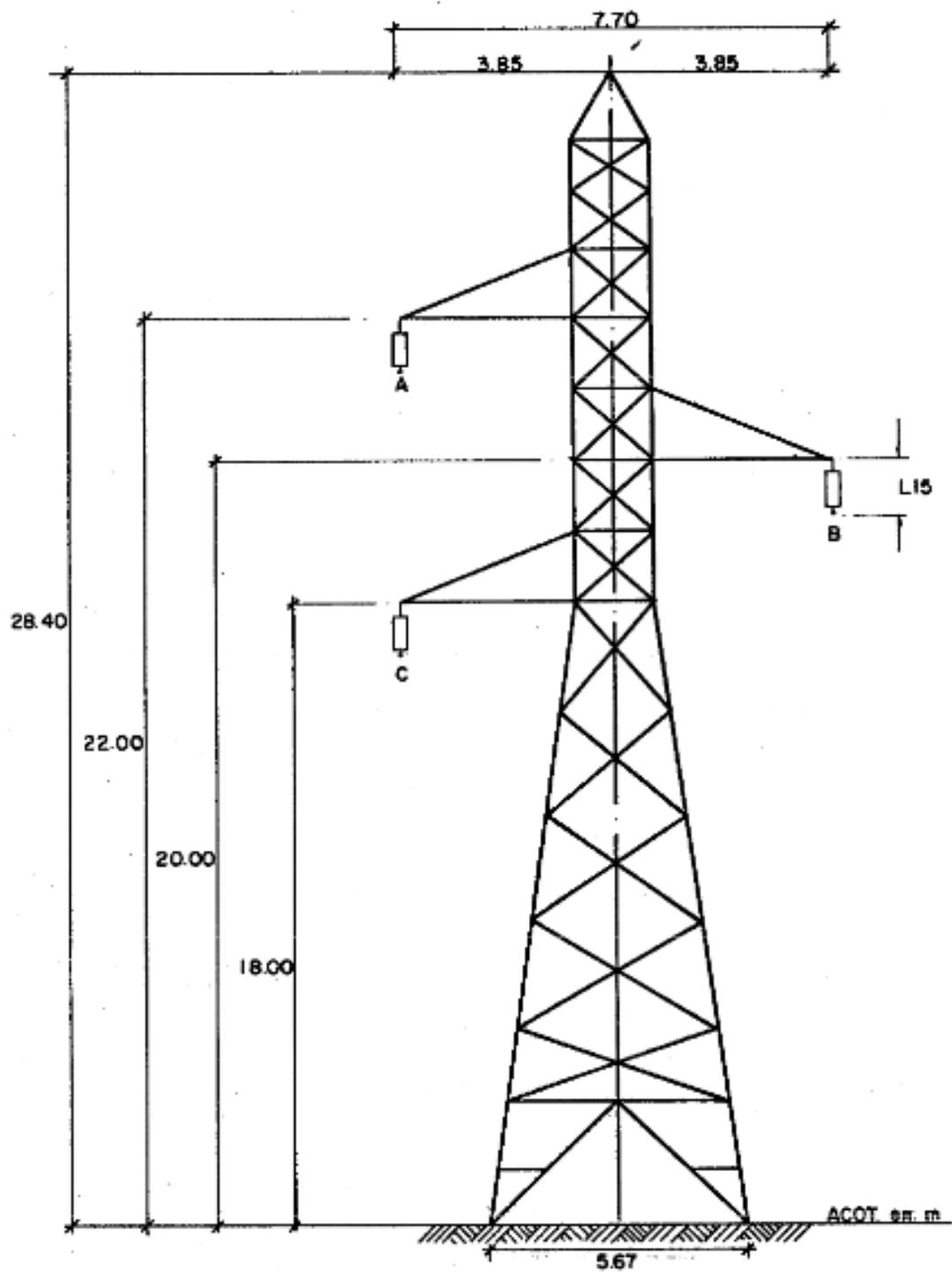


Figura. 1.6 Torre autoportada 115kV

Torres con Retenidas.

Se usan en CFE con una trabe horizontal sostenida con uno o dos puntos que trabajan exclusivamente a compresión, la estabilidad mecánica se asegura por medio de tirantes (retenidas) con la disposición apropiada.

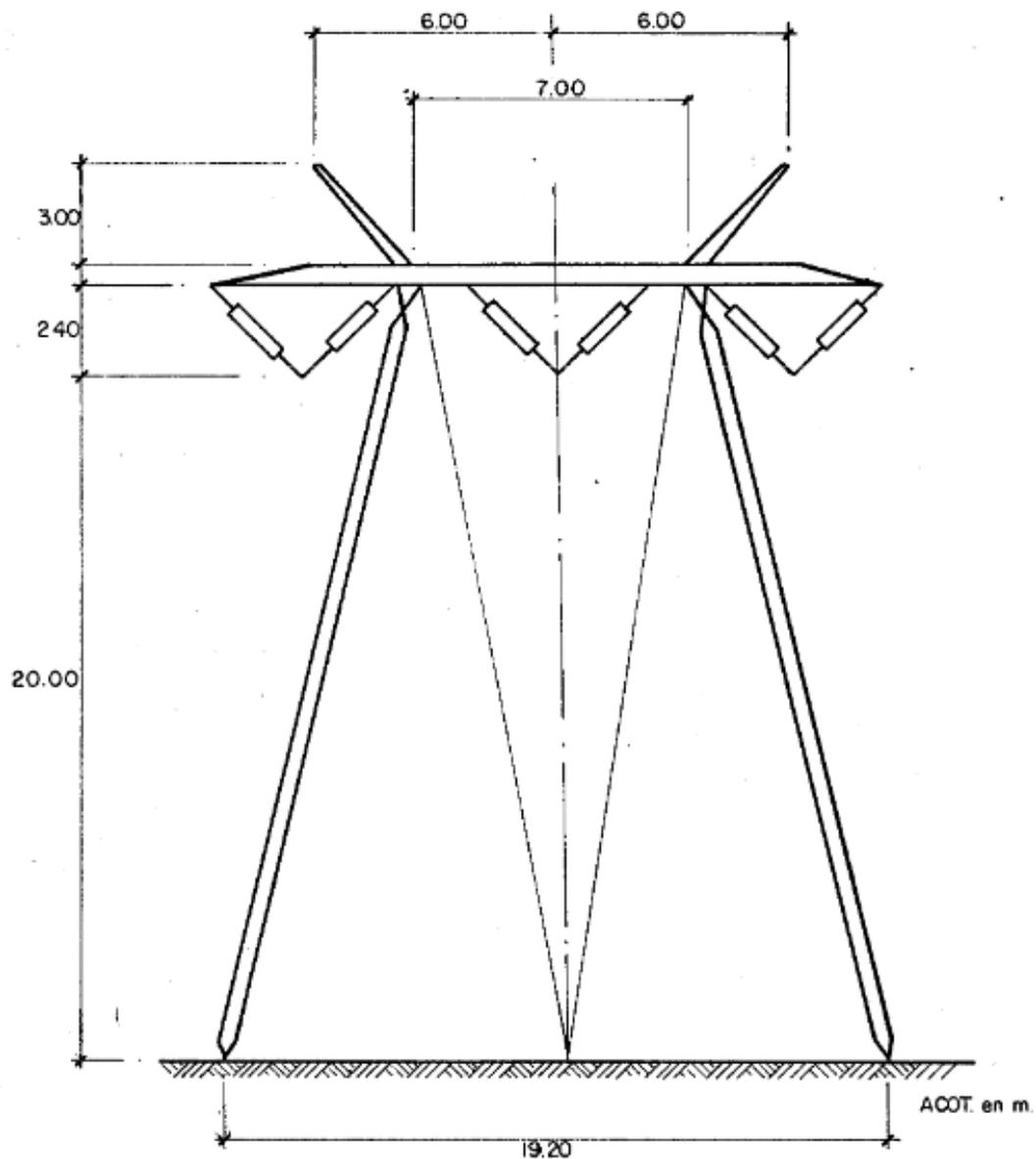


Figura. 1.8 Torre de retenida para 230kV.

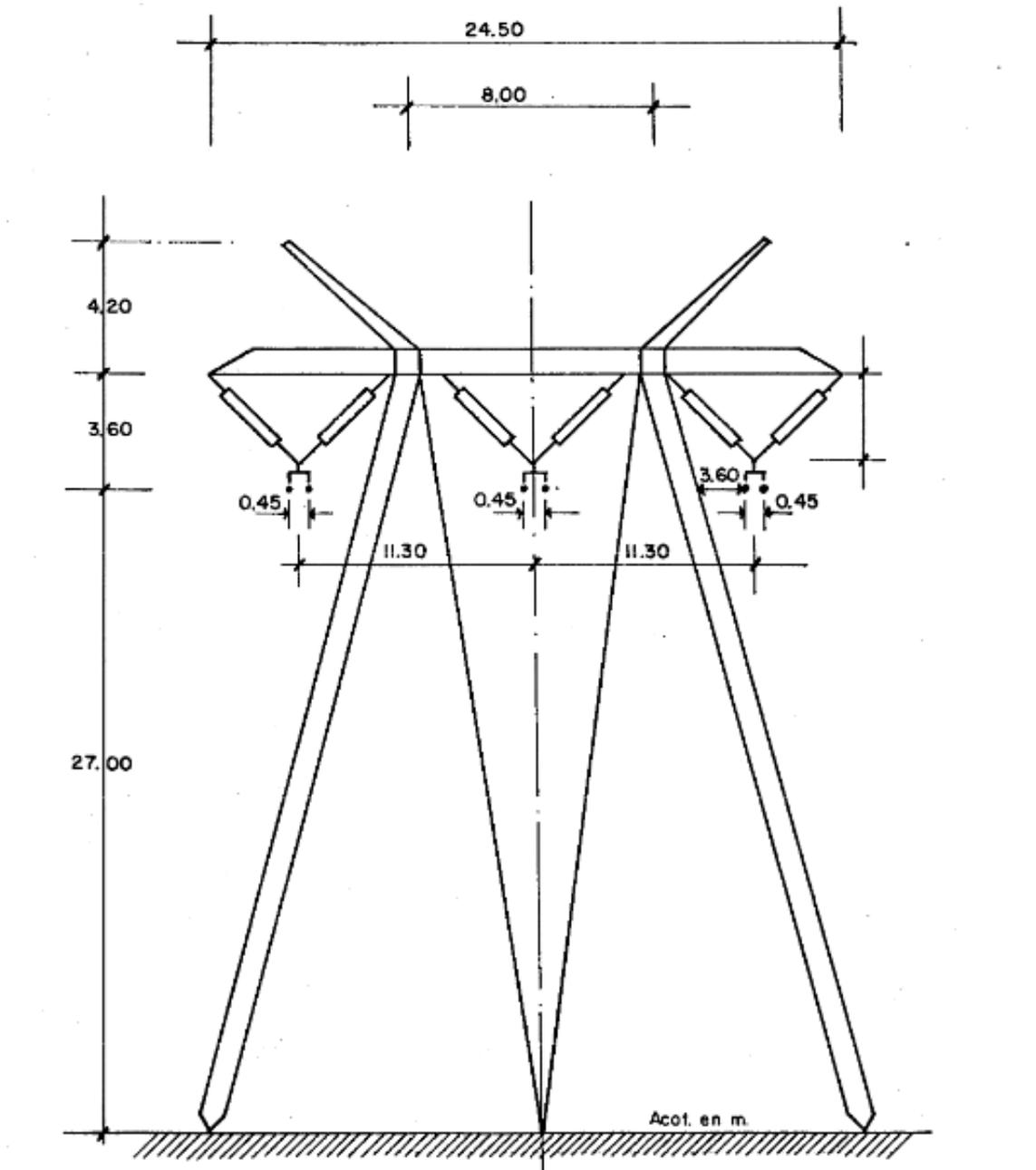


Figura. 1.9 Torre de retenida para 400kV

CAPITULO II

FLAMEO INVERSO

Se conoce como *flameo inverso* al fenómeno de rotura de la rigidez dieléctrica en la cadena de aisladores de la línea, por efecto de la sobretensión que produce la descarga atmosférica sobre el hilo de guarda o sobre la torre.

En principio las ondas de corriente que inciden en los cables de guarda o en las torres son conducidas a tierra a través de las mismas. De manera que se espera que el terreno y los elementos de conexión a tierra de la torre, en forma combinada, den un valor conocido como “resistencia al pie de la torre” que sea lo suficientemente bajo (menor o igual a 10Ω) para evitar el fenómeno de reflexión de ondas de forma importante.

Cuando se tiene una descarga atmosférica en el hilo de guarda se crean ondas transitorias de corriente y voltaje que viajan hacia ambos lados del conductor, como se muestra en la figura:

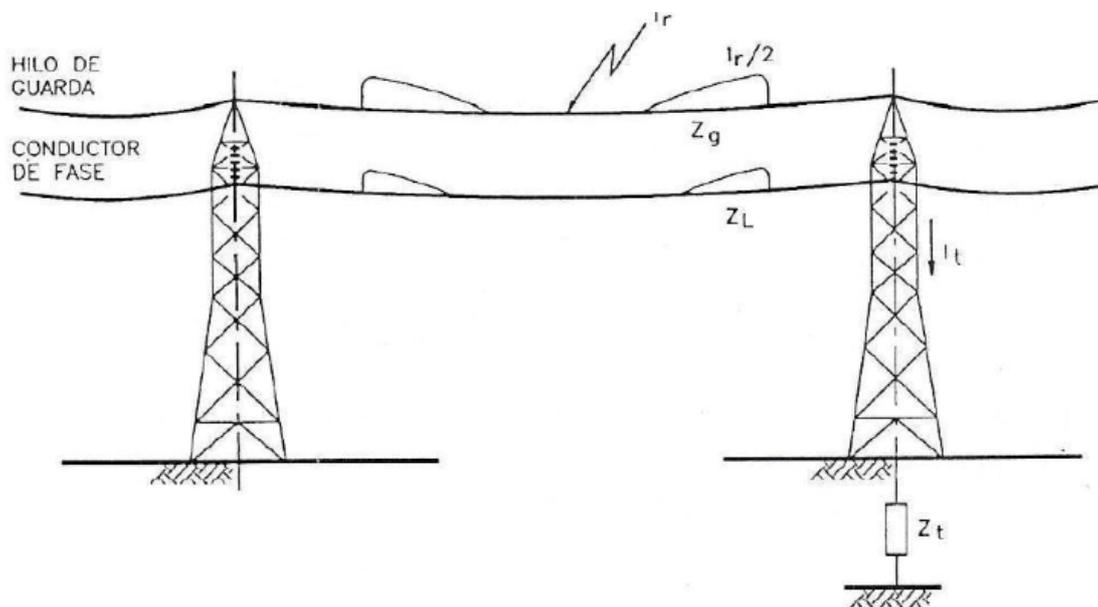


Figura 2.1 Descarga atmosférica en el cable de guarda

Al llegar la onda a un punto de cambio de impedancia, como lo es la torre, se producen ondas reflejadas y transmitidas en la punta de esta estructura, estas ondas crean diferencias de potencial en los aislamientos entre los conductores de tierra y los conductores de fase, en diferentes puntos de la línea, estos puntos pueden ser a lo largo del claro o en los aisladores

sostenidos en las torres. En el caso de que este potencial exceda los potenciales del aislamiento se producirán flameos inversos. En la siguiente figura se presenta el concepto general del flameo inverso:

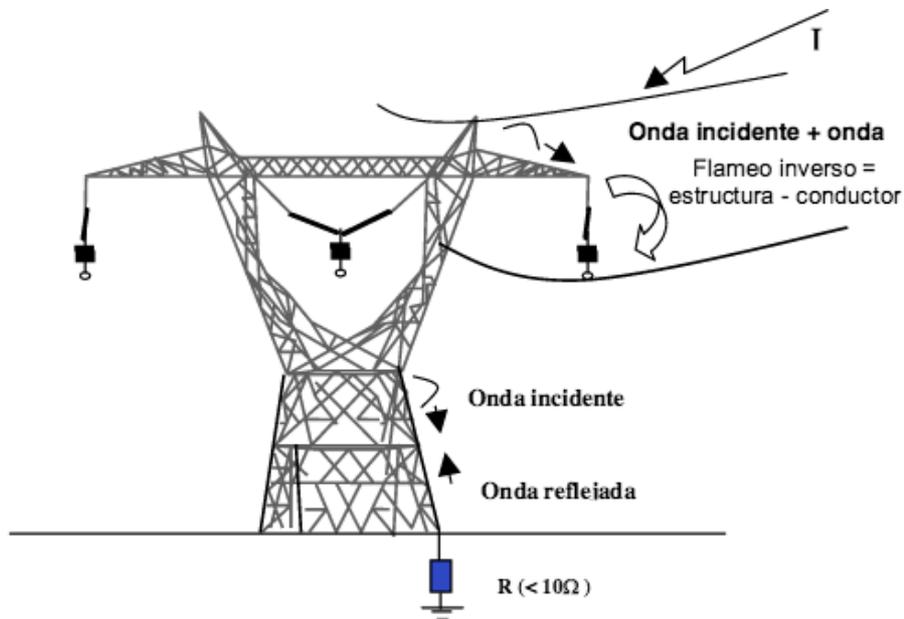


Figura 2.2 Concepto general de flameo inverso

Los flameos inversos en las torres son los más frecuentes. Por lo que para el diseño de protección para este fenómeno se deben considerar problemas por flameos inversos en las torres, despreciando los flameos inversos en los claros de las líneas. En general el flameo inverso es influenciado por los siguientes factores:

- Distancias entre conductores y distancia entre el conductor y la estructura.
- Longitud de claro entre las torres.
- Número de hilos de guarda y su posición.
- Geometría de la estructura.
- Resistencia de conexión a tierra de la estructura.
- Punto de incidencia del rayo.
- Distribución de amplitudes de corrientes de rayo y formas de onda.
- Densidad de rayos a tierra de la zona.
- Tensión de operación de la línea.

Toma el nombre de flameo inverso (back – flashover) porque se genera desde el brazo de la

torre hacia el conductor de fase, como puede apreciarse en la figura:

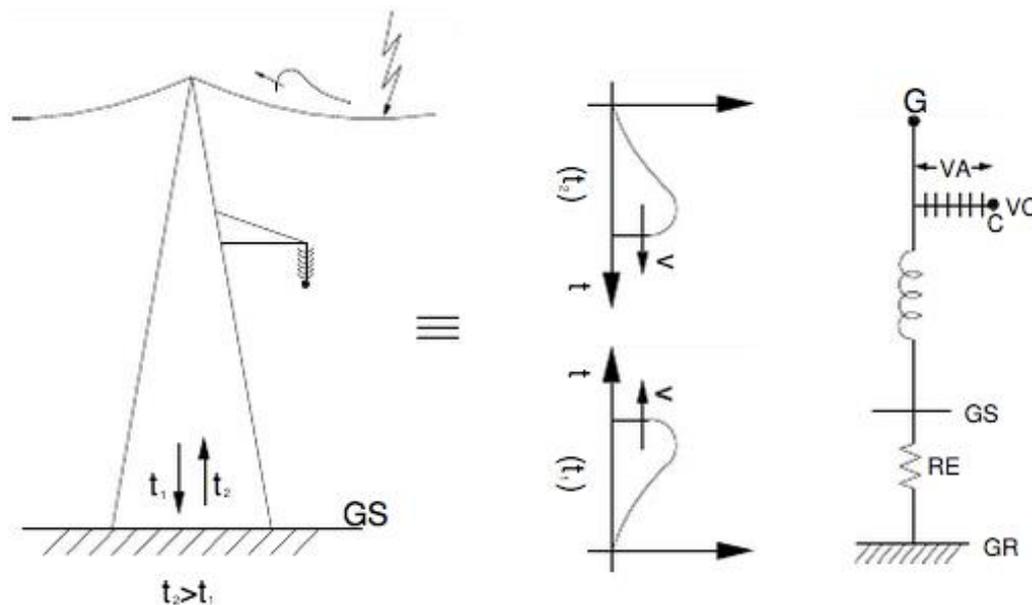


Figura 2.3 Flameo inverso en una torre de transmisión con su circuito eléctrico equivalente.

Alternativas para la corrección del fenómeno de flameo inverso.

Las líneas de transmisión de Alta Tensión están instaladas sobre torres enrejadas de acero. Debido a la longitud de estas líneas, si penetran en una zona con actividad atmosférica significativa, con susceptibles a recibir impactos de rayo directos y efectos inducidos debido a la caída de rayos en la región o a descargas entre nubes. Para dar la protección adecuada, se incorpora un cable de tierra sobre los conductores. Este cable está puesto a tierra al comienzo y al término de cada línea y en todas las posiciones de soporte. En general, el electrodo de tierra en el punto de soporte está formado por las patas de acero de las torres, enterradas en concreto en el suelo.

Esto proporciona normalmente una impedancia a frecuencia de potencia de 10Ω o menos, sin embargo, en suelo de alta resistividad, la impedancia puede ser demasiado alta y en caso deben instalarse electrodos de tierra adicionales.

Si un rayo impacta una torre, entonces parte de la corriente asociada será derivada a tierra por las bases de la torre y otra parte viajará a las torres adyacentes a través del cable de tierra aéreo. La tensión que aparece en la torre puede ser suficiente en algunos casos para superar el

voltaje de ruptura de los aisladores de la línea y ocurrirá una descarga de retorno (back-flashover) desde la torre a los conductores de fase.

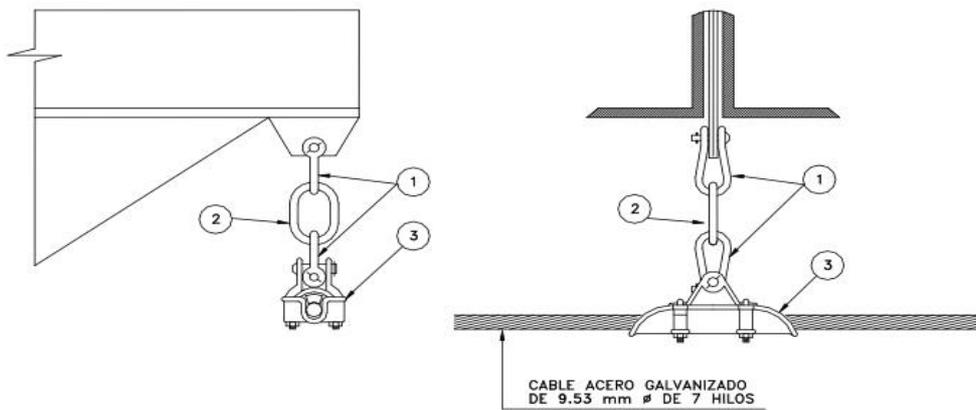
El arreglo de electrodos de tierra puede ser un lazo horizontal situado a un metro o más hacia fuera de cada pie de torre, posiblemente con algunas barras verticales conectadas a él. Con resistividad de suelo alta, puede ser necesario instalar electrodos horizontales largos (aproximadamente 20m) dirigidos Radialmente hacia fuera desde los pies de la torre. En los peores casos, se agrega un alambre de tierra enterrado que sigue a la línea en forma subterránea.

Hilo de guarda.

Los hilos de guarda unen las estructuras más importantes, solo influyen en la corriente de falla que circulará por la malla.

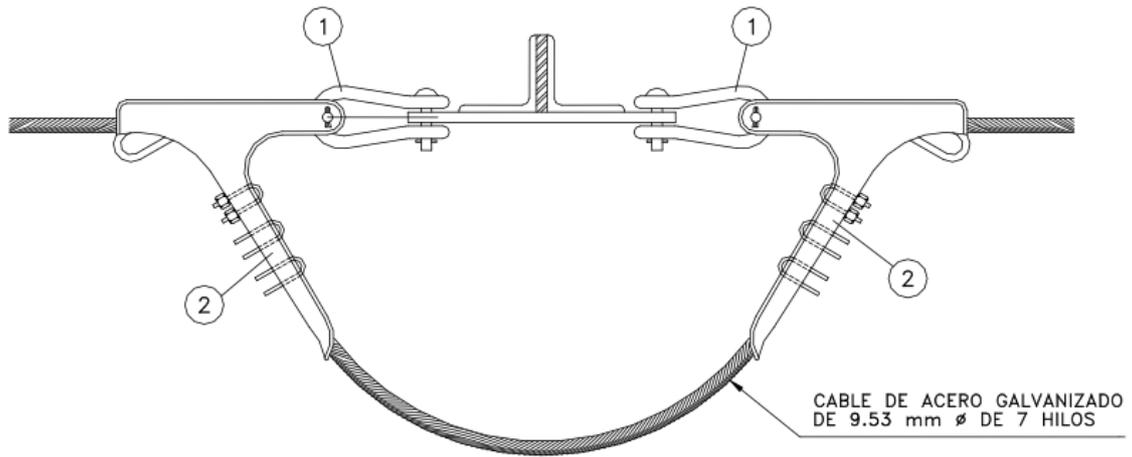
Los cables de guarda para las líneas de transmisión de 115, 230 y 400kV están formados por 7 hilos, es un conductor desnudo de 9.5mm de diámetro, fabricado con alambres de acero galvanizado de alta resistencia mecánica, cobre duro, ACSR, copperweld, bronce fosforado, etc. Se localiza en la parte superior de las torres de transmisión y debe conectarse al sistema de tierras de la torre; su función principal es proteger a los conductores de fase de las descargas atmosféricas que pudiesen incidir en éstos y conducir las descarga a tierra. conducir las descarga a tierra.

Número de hilos	7
Diámetro	9,5 mm
Área	51,2 mm²
Peso	406 kg/km
Carga de ruptura	4900 kg
Módulo de elasticidad inicial	15747 kg/mm²
Modulo de elasticidad final	18137 kg/mm²
Coefficiente de dilatación lineal	11,52 x 10⁵ /°C



LISTA DE ELEMENTOS			
No.	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	DIBUJOS DE REFERENCIA
1	2	HORQUILLA RECTA	HR-HG
2	1	ESLABON	E-HG
3	1	GRAPA DE SUSPENSIÓN	GS-GH

Figura. 2.4 Cadena de suspensión para hilo de guarda en líneas de transmisión.



LISTA DE ELEMENTOS			
No.	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	DIBUJOS DE REFERENCIA
1	1	HORQUILLA RECTA	HR-HG
2	1	GRAPA DE TENSIÓN	GT-HG

Figura 2.5 Cadena de tensión para hilo de guarda en líneas de transmisión.

En la parte alta de las torres se conecta a los hilos de guarda un cable de tierra que sirve para derivar a tierra las ondas de sobretensión inducida por las descargas.

Se debe evitar que las descargas o el arco salte de los hilos de guarda a los conductores de fase, para ello, generalmente se adopta la distancia que hay entre los conductores de fase y los hilos de guarda de por lo menos la misma distancia que hay entre conductores de fase.

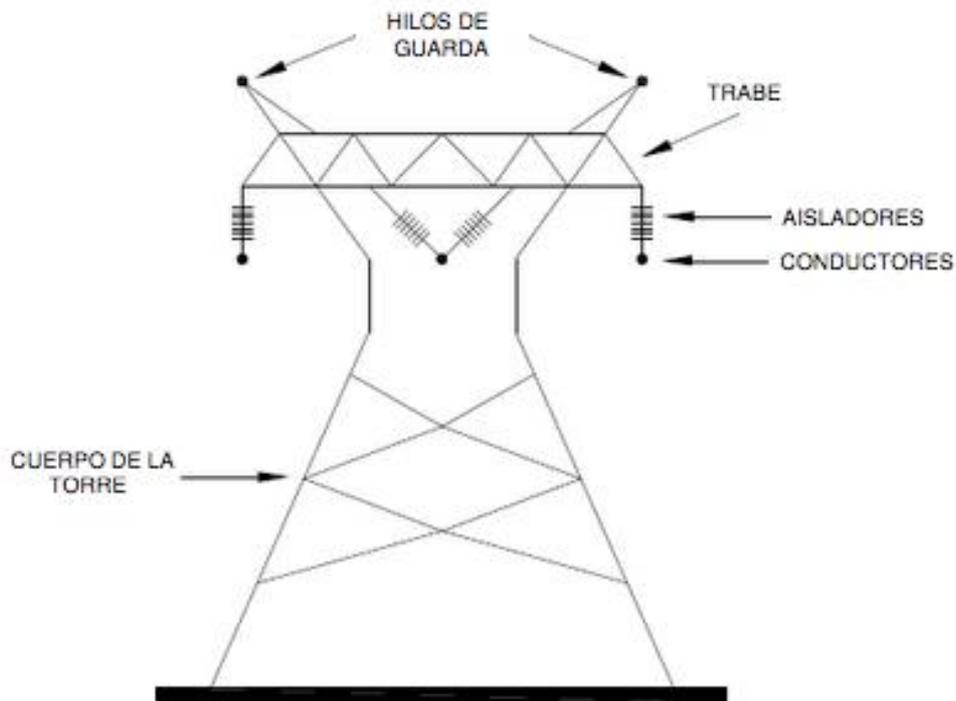


Figura 2.6 Elementos de la torre de transmisión.

El cable de guarda protege de distintas maneras:

- a) Dando a la línea una impedancia pequeña externa posible, disminuyendo así la tensión.
- b) Disminuye la carga inducida por las nubes en la línea al ofrecer inmediatamente cargas traídas del suelo en cantidades ilimitadas para satisfacer las necesidades del campo de la nube.
- c) Al descargar la nube sobre la línea de transmisión, las cargas capturadas por el cable van directamente al sistema de puesta a tierra. Una conexión fallida a tierra nulifica el efecto protector del cable.
- d) Si el cable está bien situado y bien conectado pueden suceder alguna de las siguientes eventualidades:
 - Que sea el único conductor en la línea de transmisión tocado por la descarga atmosférica.

- Que la mayor parte de la descarga atmosférica, sea conducida por el hilo de guarda, en donde resulta una disminución considerable de la sobretensión para el sistema.
- Que las descargas atmosféricas de magnitud mediana hagan flamear los aisladores de una fase, en lugar de afectar los tres polos y causar una falla trifásica.

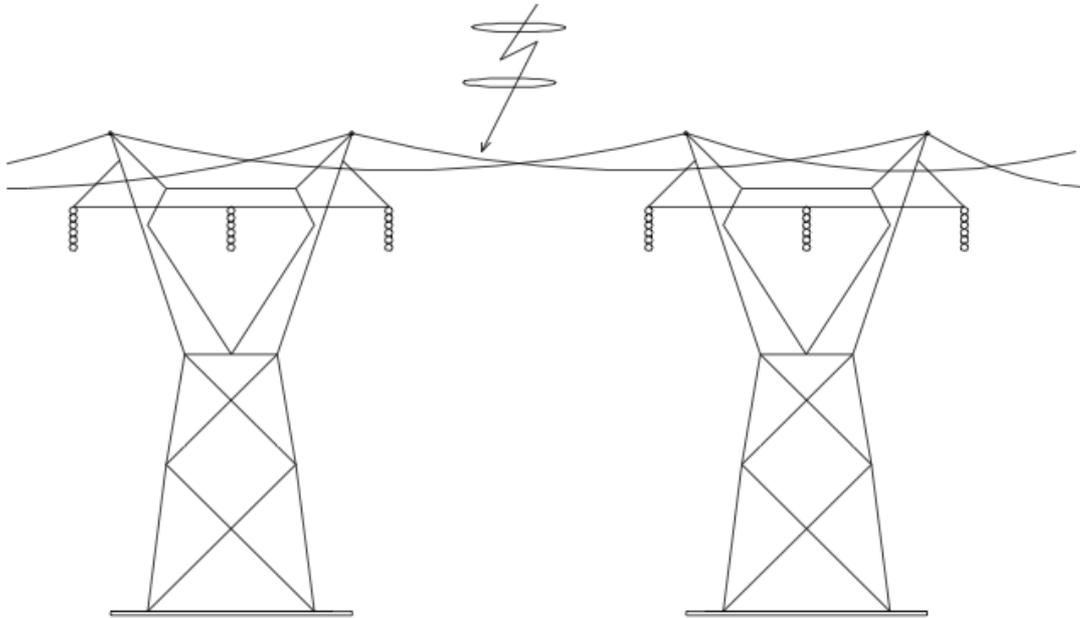
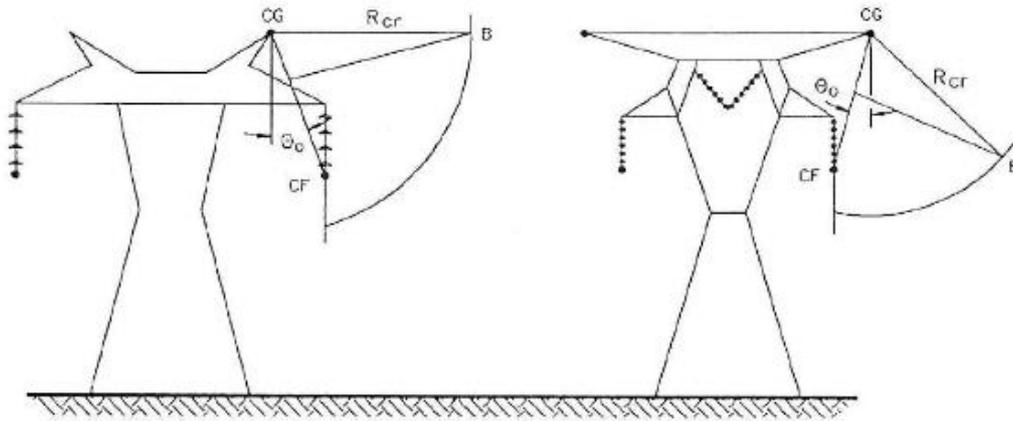


Figura 2.7 Descarga atmosférica sobre el hilo de guarda

Ángulo de blindaje.

La siguiente figura muestra la variación del ángulo de blindaje, de positivo a negativo, al variar la posición del hilo de guarda con respecto a un conductor de fase. El objetivo de la selección del número de hilos de guarda y su posición es interceptar los rayos y reducir las fallas de blindaje a un número aceptable.



Ángulo de blindaje positivo

Ángulo de blindaje negativo

Figura. 2.8 (a, b)

Métodos de ubicación del cable de guarda.

Estos métodos se basan principalmente en criterios geométricos sin mayores fundamentos teóricos que los resultados obtenidos de su aplicación.

- Charles
- Wagner y Mac Cann
- Schwaiger

Método Charles.

Este criterio establece un ángulo de apantallamiento $\alpha = 45^\circ$ con la vertical, de modo tal que la descarga atmosférica no caerá sobre ningún objeto que se encuentre dentro del cono delimitado por dicho ángulo. Este criterio es poco severo y permite ubicar el cable de guarda a menor altura.

El apantallamiento que brindan los cables de guarda de la línea según este criterio se puede ver a continuación, se observa que las fases exteriores tienen un apantallamiento excesivo mientras que las fase central no resulta protegida.

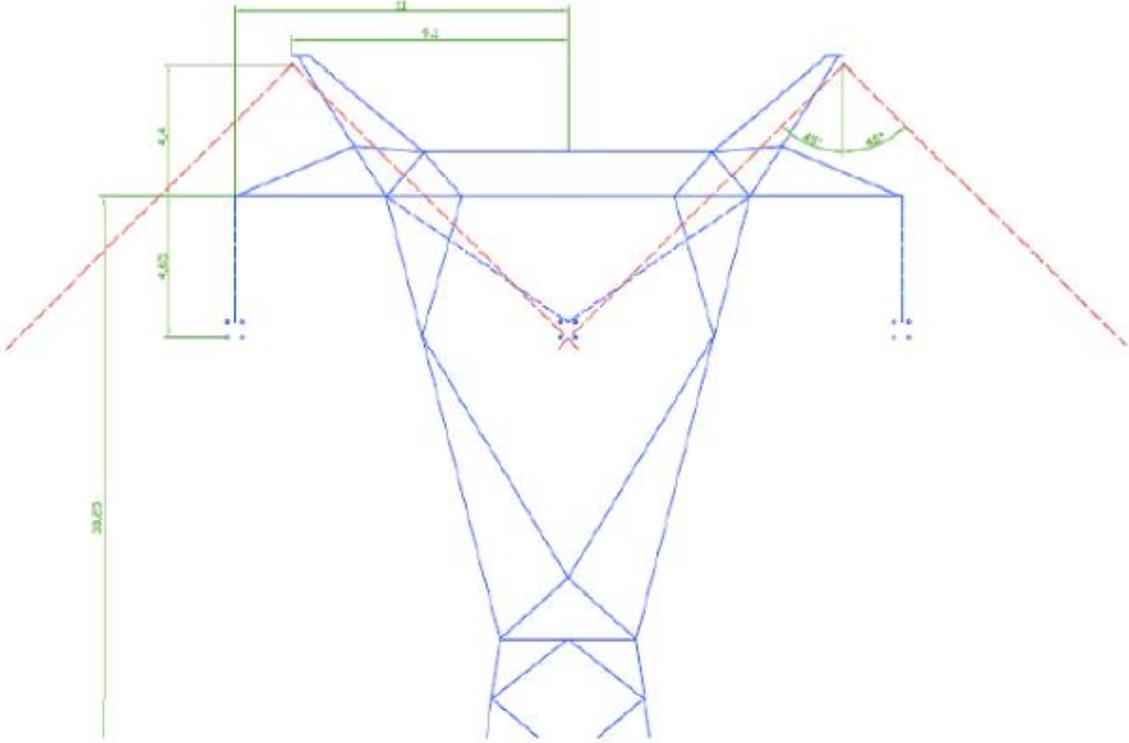


Figura. 2.9 Zona de protección Charles

Según este método tenemos dos alternativas, cable de guarda doble o simple. La ubicación de dos cables evita colocar una estructura adicional como se muestra en en la siguiente figura.

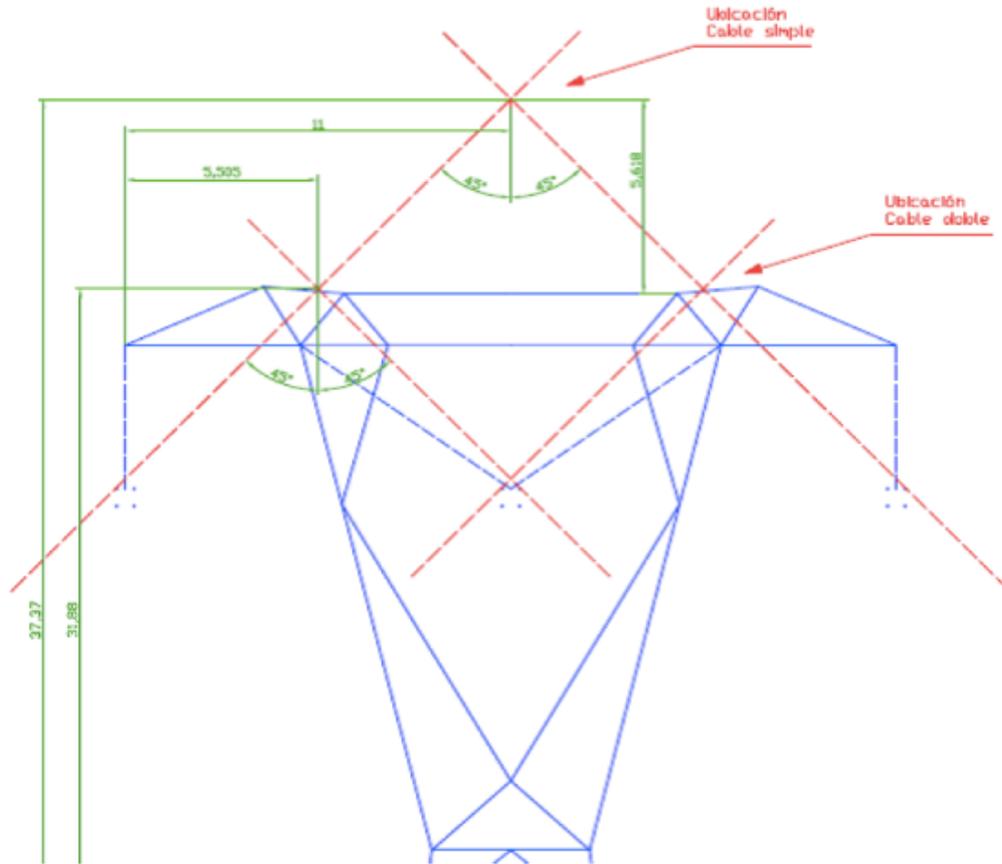


Figura. 2.10 Zona de protección Charles

Método Wagner y Mac Cann

De forma similar al anterior, en este caso los autores consideran que los cables de guarda protejan un ángulo $\alpha = 30^\circ$ con la vertical, esto resulta en una combinación más elevada del cable de guarda.

El apantallamiento que brindan los cables de guarda de la línea según este criterio se puede notar en la siguiente ilustración, se observa que solamente las fases laterales resultan protegidas.

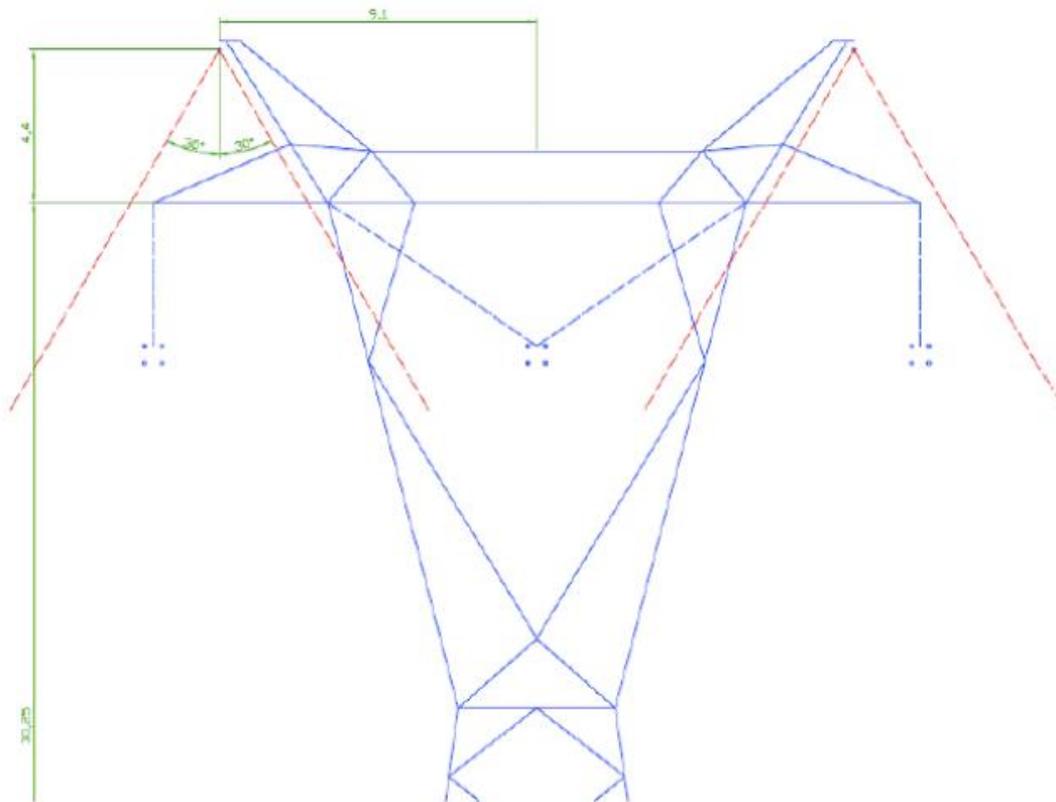


Figura 2.10 Zona de protección Wagner y Mac Cann

Podemos reubicar los cables de guarda bajo este criterio, de manera tal, que resulten protegidos todos los conductores, como se muestra a continuación:

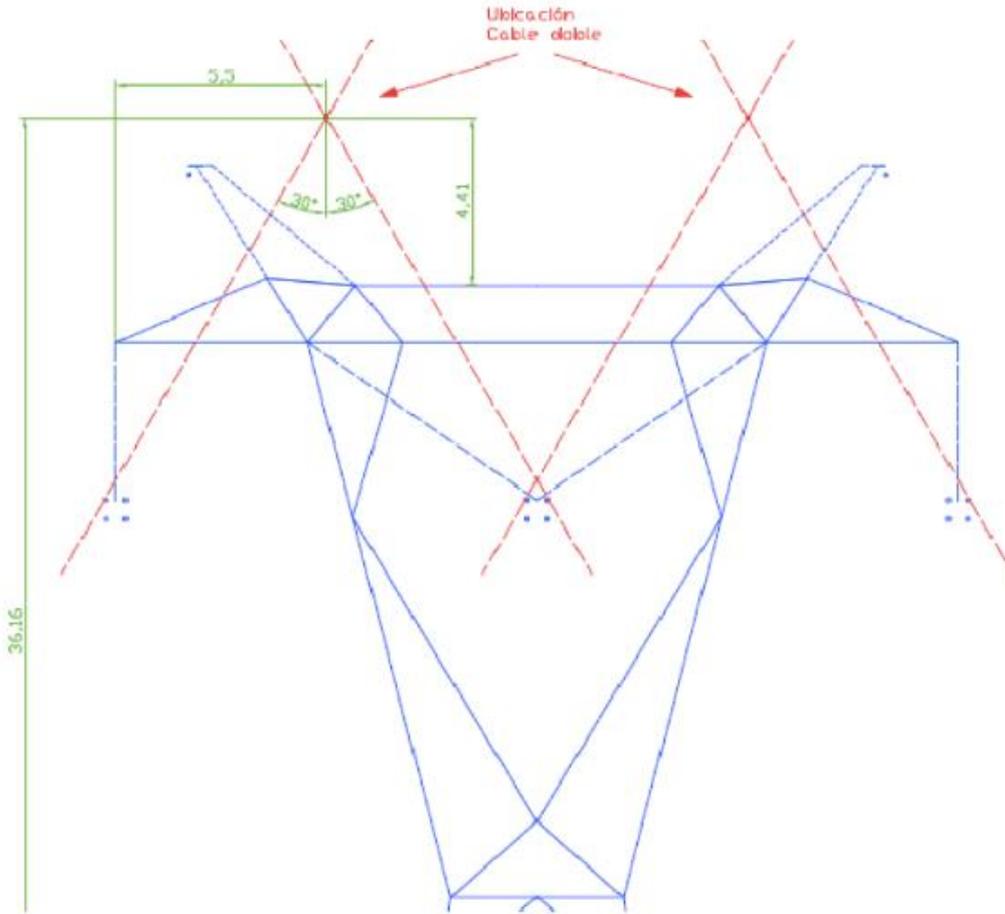


Figura 2.11 . Zona de protección Wagner y Mac Cann

Método Schwaiger

Este método considera que cuando el trazador de una descarga atmosférica se aproxima a la tierra, este alcanza una altura H (medida desde el suelo) en la cual elige para caer el punto conectado a tierra más cercano. Teniendo en cuenta esta afirmación, se puede determinar una altura h a la cual instalar un elemento captador, proporcionando una zona de protección.

Schwaiger, autor del método, toma la relación $\frac{H}{h} = 1$ siendo H el punto donde se encuentra la punta del rayo, y h la altura del cable de guarda. La zona de protección resultante queda determinada por un cuarto de circunferencia de radio h , como se puede ver a continuación, de modo que resultará protegido lo que se encuentre por debajo de esta.

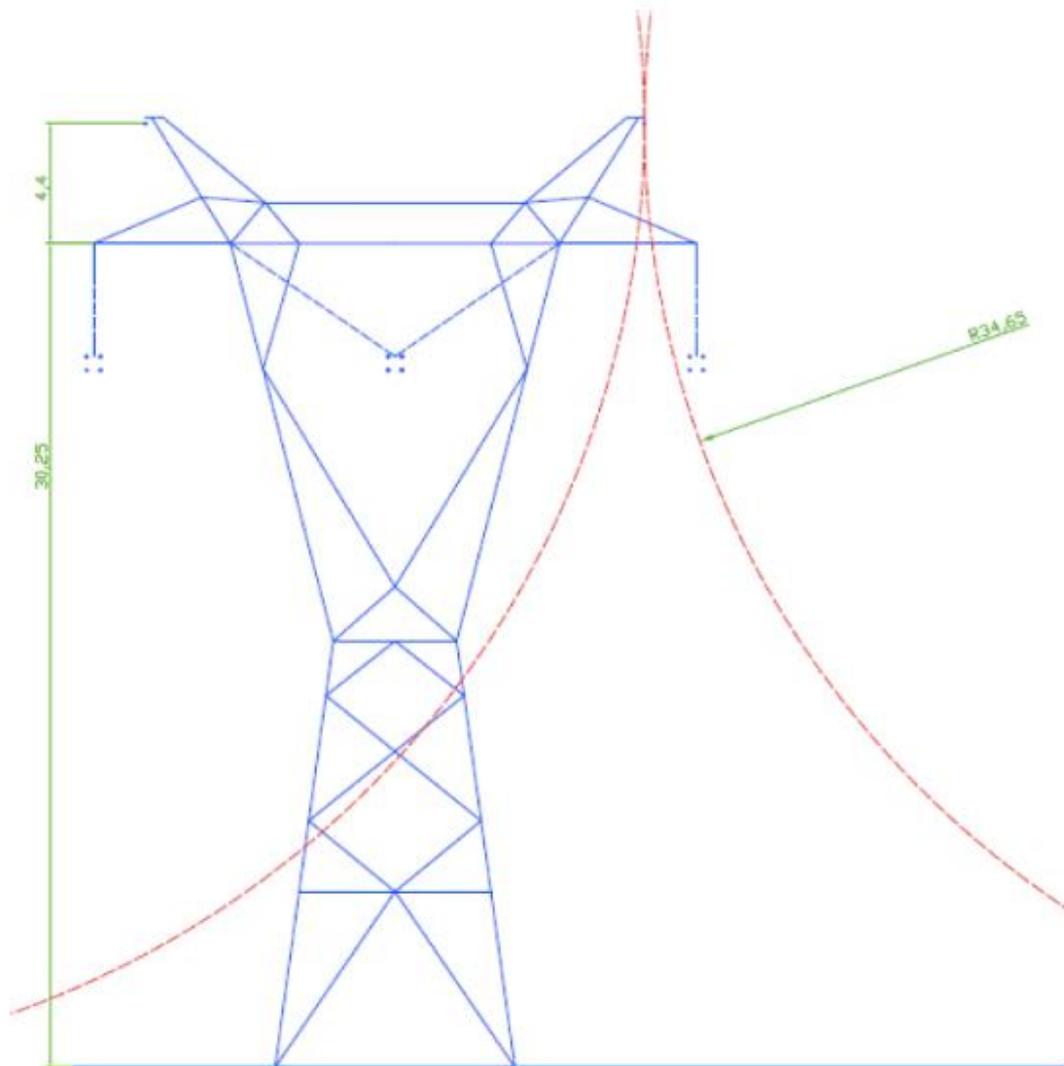


Figura 2.12 Zona de protección Shwaiger.

Se puede determinar la altura a la que deberían instalarse los cables de guarda, según este criterio, para lograr que los conductores de potencia resulten protegidos. Para ello se calcula la altura mediante la ecuación siguiente:

$$h^2 = (y_c - h)^2 + (x_c - h)^2 \quad (2.1)$$

Donde:

y_c = Altura del conductor de fase

h = Altura del cable de guarda

x_c = Distancia media entre conductores de fase

Puesta a tierra

Los sistemas deben conectarse a tierra para limitar las sobretensiones eléctricas debidas a descargas atmosféricas y/o transitorios en la red por contacto accidental en las líneas de alta tensión, y para estabilizar la tensión durante su operación. Los equipos se conectan a tierra de tal modo que ofrezcan un camino de baja impedancia para limitar la diferencia de potencial que, en un momento dado se puede presentar entre las estructuras metálicas.

Cuando se hace la instalación de puesta a tierra pensamos en una varilla o una malla de metal conductora (red de tierra), ahogada en el terreno inmediato de la instalación eléctrica, con el fin de que las descargas fortuitas sean confinadas en forma de onda y se dispersen en el terreno subyacente.

Funcionalidad de los sistemas de tierras.

Con respecto a su funcionalidad, los sistemas de tierras son clasificados por:

- Sistemas de tierra de protección.
- Sistemas a tierra de funcionamiento.
- Sistemas de tierra de trabajo.

Sistemas de tierra de protección.

Limitan el valor de la tensión contra tierra en las partes del sistema eléctrico que no deben de ser mantenidas ni en tensión ni aisladas y con las cuales pudiera estar en contacto el personal.

Sistema de tierra de funcionamiento.

Este sistema es necesario para un funcionamiento adecuado, generalmente se conectan los neutros de los generadores y transformadores, apartarrayos, etc.

Sistema de tierra de trabajo.

Estos sistemas de protección son de carácter provisional, normalmente utilizados para poner a tierra una parte del circuito o instalación eléctrica para efectuar un trabajo o alguna reparación.

Componentes de sistemas a tierras.

Los sistemas de tierras están integrados por tres elementos principales:

Dispensor o electrodo.

Constituido por un cuerpo metálico o un conjunto de cuerpos metálicos puestos en contacto directo con la tierra y destinados a dispersar las corrientes de tierra, Así los electrodos elementales son aquellos que se utilizan para poner a tierra medios de servicio e instalaciones electrotécnicas de manera unitaria, es decir, cuando se drena a tierra toda la corriente a través del electrodo. Generalmente como electrodos se adoptan formas bien definidas, tales como: semiesferas, placas circulares o elípticas, varillas sólidas, tubos y conductores cilíndricos.

El conductor de tierra.

Constituido por un conductor que sirve para unir las partes de puesta a tierra con el dispensor.

Colectores eventuales de tierra.

Es el conjunto de colectores, de los cuales se hacen más dispersos y conductores de corriente. Es la combinación de formas geométricas de electrodos, por medio de estas combinaciones se hacen derivaciones de corriente a tierra de manera distribuida.

Características principales para los sistemas de puesta a tierra.

Corriente de tierra I.

Corresponde al valor máximo que se tiene de la corriente en Ampere y que debe de ser dispersada en el sistema de tierra.

Tensión de tierra V.

Equivale a la máxima diferencia de potencial entre el sistema de dispersión y un punto en el infinito, cuando el sistema de tierra dispersa la corriente de tierra I prevista. Este valor se mide en Volts.

Gradiente de tierra E.

Indica en V/m la diferencia de potencial entre dos puntos cuya distancia del varía en un metro.

Resistencia de tierra R.

Este valor debe de ser lo más bajo posible y depende directamente de la resistividad del terreno en el cual está enterrado el sistema de dispersión y de sus características particulares como su forma geométrica, extensión y tipo de dispersión usado, etc.

El factor más importante de la resistencia a tierra no es el electrodo en sí, sino la resistividad del terreno, la resistividad de la tierra varía con el contenido de humedad y cambios de temperatura, por ello, el sistema debe ser diseñado tomando en cuenta la resistividad.

Temperatura.

La resistividad crece lentamente a medida que la temperatura disminuye hasta llegar al punto de congelación del agua (0 °C). Por debajo del punto de congelación, la resistividad crece rápidamente al disminuir la temperatura. En zonas frías, donde en invierno congela el suelo hasta cierta profundidad aumenta el valor de la resistividad hasta 200 veces. En estos casos, el sistema de tierra debe instalarse por debajo del nivel de congelación si se pretende un valor aceptable del valor de la resistencia a lo largo de todo el año. Por la cual, el electrodo debe de llegar hasta la capa freática por lo que en esta capa la resistencia no sólo es muy baja sino que también es de un valor estable.

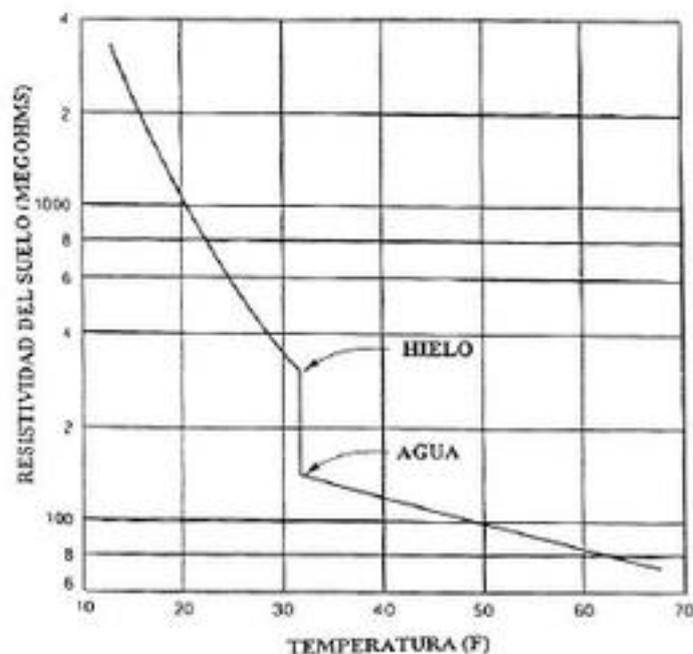


Figura 2.13 Gráfica de la resistividad en función de la temperatura

Humedad.

Cuando el terreno es completamente seco, adquiere una resistividad muy alta. La resistividad disminuye rápidamente hasta que la humedad alcanza el 20%, a partir de ese porcentaje sólo se consigue una pequeña disminución de la resistividad con el aumento de la humedad. Con

un valor del 30% y decreciendo a 5% la resistividad aumenta alrededor de 400 veces. En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento de la resistividad del terreno cuando es afectado por la humedad.

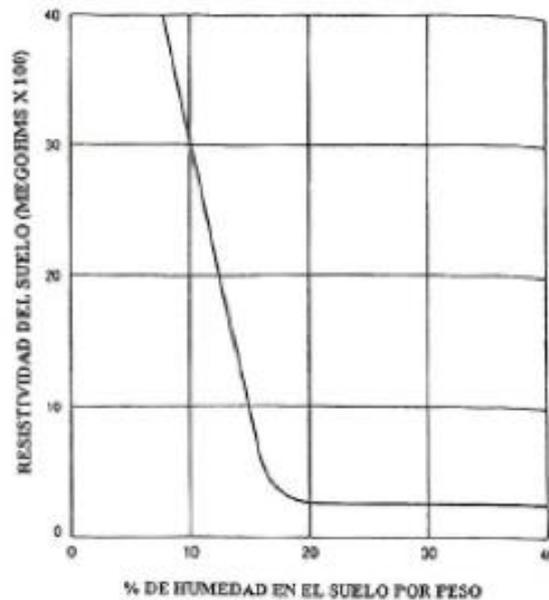


Figura. 2.14 Gráfica de la resistividad en función de la humedad

Resistividad.

La resistividad (ρ) eléctrica del terreno es la resistencia de la unidad de volumen de algún material del suelo, es decir, es la propiedad del suelo para conducir electricidad. Se mide en unidades de resistencia eléctrica por longitud, se expresa en ohm-metro.

Para obtener el valor de la resistividad del terreno se utiliza un megohmetro de tierras de cuatro terminales con sus cuatro puntas enterradas a la misma distancia, y espaciadas a la misma longitud en línea recta. A éste método se le conoce como “Método Wenner”.

Dependiendo del tipo de terreno se tiene un diferente valor de resistividad. En la siguiente tabla se muestran algunos valores.

TABLA 2 DIFERENTES TIPOS DE TERRENOS Y SUS RESISTIVIDADES.

NATURALEZA DEL TERRENO	RESISTIVIDAD ρ (Ω/m)
Terrenos pantanosos	De algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceas	200 a 3,000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1,500 a 3,000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1,000 a 5,000
Calizas agrietadas	500 a 1,000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedentes de alteración	1,500 a 10,000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600
Hormigón	2,000 a 3,000
Balasto o grava	3,000 a 5,000

Metodología para el cálculo de la descarga retroactiva (Back-flashover)

Las sobretensiones de retorno se pueden presentar cuando sobretensiones de origen atmosférico debidas al rayo en las líneas de transmisión, por descarga directa sobre los conductores de fase, porque no exista blindaje o bien porque el blindaje no opere correctamente (falta de blindaje).

La denominada descarga retroactiva se presenta por lo general cuando el rayo incide en forma directa sobre una torre de la línea o sobre los cables de guarda. Los casos extremos son que caiga el rayo en forma franca sobre la torre o bien sobre los conductores en el punto medio del claro sobre los cables de guarda, y como estos están conectados directamente a las torres, la corriente se conduce a través de éstas a tierra. En ambos casos influye la forma en como se encuentran conectadas a tierra las torres.

De estudios realizados, se tiene una distribución porcentual de la corriente del rayo, según se que incida sobre la torre directamente o sobre los conductores de fase.

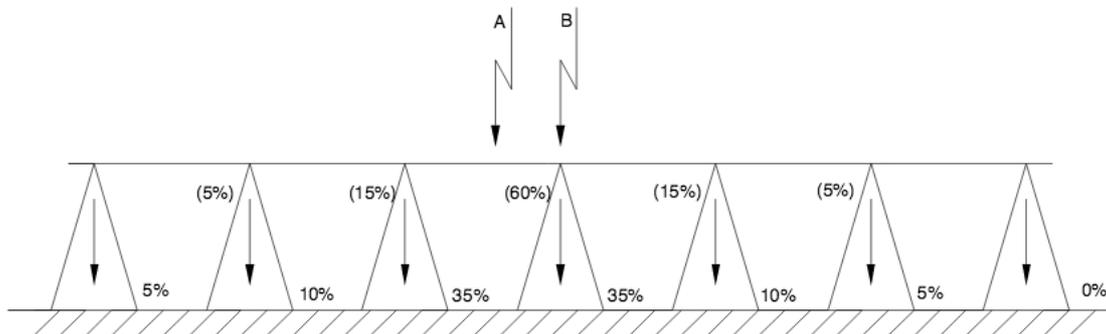


Figura. 2.15 Distribución porcentual de la corriente de rayo.

Para una descarga directa a torre, esta conduce aproximadamente un 60% de corriente.

Desde el punto de vista práctico, la corriente del rayo al ser conducida a tierra por las torres metálicas, produce una caída de tensión V_p en la resistencia de conexión a tierra de la torre.

Esta caída de tensión se puede expresar en forma simplificada por la Ley de Ohm como:

$$V_p = I_T R_p \quad (2.2)$$

Donde:

I_T = Corriente a través de la torre.

R_p = Resistencia al pie de la torre.

El potencial total que aparece en la línea en caso de descarga atmosférica es:

$$V = I_T R_p + L \frac{di}{dt} - V_k + V_i \pm V_n \quad (2.3)$$

Donde:

$L \frac{di}{dt}$ = Caída de tensión debida a la inductancia de la torre.

L es la inductancia de la torre y su valor se puede tomar del orden de $5 \mu H/m$

V_k = Voltaje inducido del cable de guarda al conductor de fase.

V_i = Voltaje inducido por el rayo sobre el conductor de fase.

V_n = Valor momentáneo de la tensión nominal con su respectiva polaridad.

Para algunos casos prácticos, se pueden despreciar los valores de V_k , V_i y eventualmente se puede hacer lo mismo con el término $L \frac{di}{dt}$.

Se dice que se presenta la descarga retroactiva o sobretensión de retorno cuando se cumple que:

$$V_p + |V_n| > V_A \quad (2.4)$$

Siendo V_A el valor de la tensión resistente en la cadena de aisladores, es decir, que la condición para que no se presente la descarga retroactiva es que:

$$I_T R_p + |V_n| < V_A \quad (2.5)$$

Esto significa que el valor de la resistencia de puesta a tierra no puede ser arbitrario, tiene más bien que cumplir con una condición tal que:

$$R_p < R_{p_{\max}} \quad (2.6)$$

Donde $R_{p_{\max}}$ es un valor de resistencia de puesta a tierra al cual se presente la descarga retroactiva.

Para una línea que tiene torres con dos cables de guarda, la ecuación para determinar la sobretensión de retorno se obtiene como se indica a continuación:

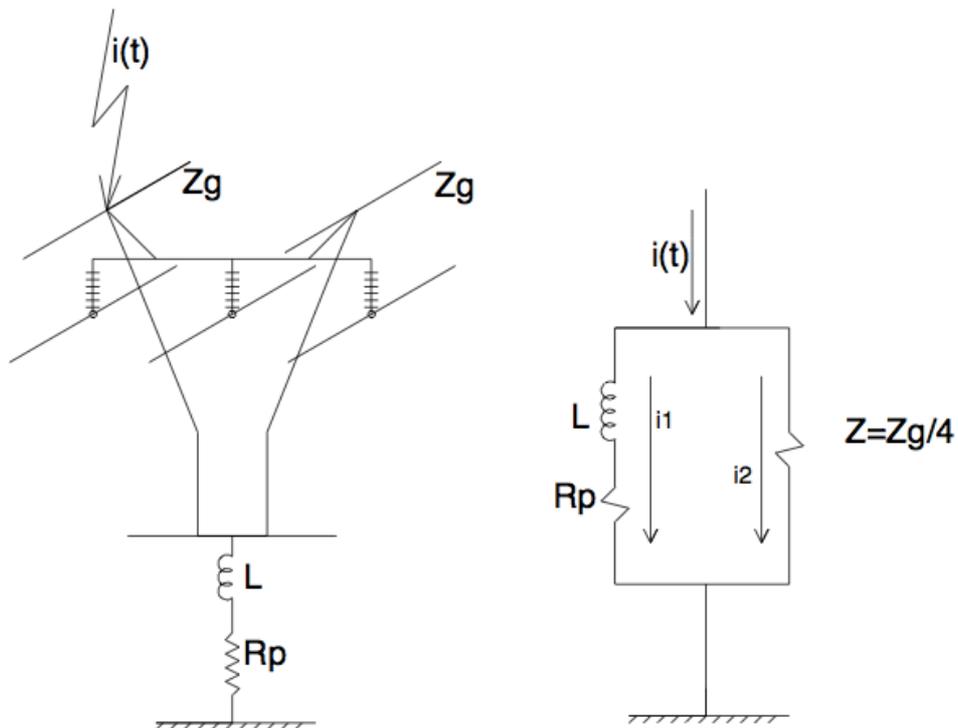


Figura. 2.16 Diagrama equivalente del sistema de tierras y los hilos de guarda ante una corriente de rayo.

El voltaje en la parte superior de la torre es:

$$V_T = \frac{R_p Z}{R_p + Z} i(t) + \frac{Z - R_p}{R_p + Z} \frac{di(t)}{dt} \quad (2.7)$$

Tomando en consideración el coeficiente de acoplamiento (C) entre los cables de guarda y los conductores de fase, así como el valor instantáneo del voltaje a la frecuencia del sistema, el voltaje a través de la cadena de aisladores (V_A) es:

$$V_A = \frac{R_p Z}{R_p + Z} i(t) - C \frac{R_p Z}{R_p + Z} i(t) + \frac{Z - R_p}{R_p + Z} L \frac{di}{dt} - \frac{Z - R_p}{R_p + Z} L \frac{di}{dt} \pm V_n \quad (2.8)$$

Si se resuelve la ecuación anterior, para obtener la expresión de la corriente del rayo necesaria para producir la descarga retroactiva es:

$$i(t) = V_A \frac{R_p + Z}{R_p Z(1 - C)} \frac{Z - R_p}{R_p Z} L \frac{di}{dt} \pm \frac{R_p + Z}{R_p Z(1 - C)} \quad (2.9)$$

Si se supone que el valor máximo del índice de elevación de la corriente del rayo $\alpha = \frac{di}{dt}$ se presente casi coincidente con el valor pico de la corriente de rayo que produce un flameo inverso en los aisladores es:

$$I_M = V_A \frac{R_p + Z}{R_p Z(1 - C)} V_A - \frac{Z - R_p}{R_p Z} L \alpha - \frac{R_p + Z}{R_p Z(1 - C)} V_n \quad (2.10)$$

CAPITULO III

SOBRETENSIONES POR RAYO EN LAS LÍNEAS

Se considera sobretensión a los valores de tensión superiores a las tensiones nominales de operación de un sistema y que es capaz de poner en peligro al equipo instalado y al óptimo suministro de energía eléctrica.

Las sobretensiones pueden producir fallas internas en los equipos de protección, además de destruir o averiar severamente el material, pueden también ser la causa de fallas más severas. Muchas veces, el peligro de las sobretensiones no se debe solamente a su magnitud, sino a la forma de onda. Si la instalación es realizada correctamente y si las líneas de conexión se encuentran en buenas condiciones, es poco probable que se produzcan sobretensiones; si a pesar de todas las precauciones, estas se producen, debe procurarse que se descarguen a tierra lo más rápido posible, mediante los dispositivos de protección instalados.

Tipos de sobretensiones

Las sobretensiones pueden agruparse, según su origen en dos grupos, del tipo interno y del tipo externo.

Sobretensiones del tipo externo.

El fenómeno de sobretensión más frecuente en las instalaciones eléctricas es originado por la descarga atmosférica (rayo), que son perturbaciones con una duración aun más pequeña que las de maniobra, siendo el tiempo de crecimiento normalizado de $1,2\mu s$ mientras que el lapso hasta que se reduce al 50% del valor máximo dura $50\mu s$ (onda de $1,2\mu s/50\mu s$), es importante el conocimiento de los efectos que causa dicho fenómeno, a fin de proporcionar una protección adecuada a la instalación eléctrica.

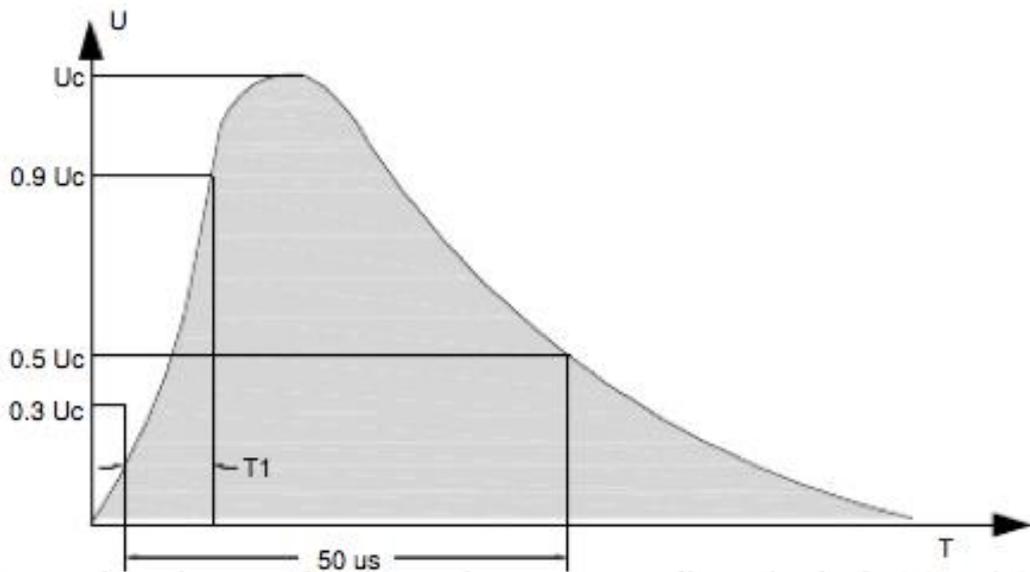


Figura. 3.1 Forma de onda normalizada por descarga atmosférica (onda de $1,2\mu\text{s}/50\mu\text{s}$).

Las sobretensiones del tipo externo son de tres tipos: por carga estática, descarga indirecta y descarga directa, descritas a continuación.

a) Sobretensión del tipo externo por carga estática.

Este tipo de sobretensión actúa cuando una formación nubosa existe sobre la línea de transmisión, de tal manera que va separando las cargas positivas y negativas en los conductores por inducción electrostática.

b) Sobretensión del tipo externo por descarga indirecta.

Esta sobretensión se presenta en la instalación eléctrica cuando ocurre una descarga atmosférica en puntos cercanos a ésta. Debido a las características de alta potencia del rayo (200kA , 200kV), se induce una onda electromagnética. Este tipo de sobretensión es el tipo más frecuente y por el valor de sus parámetros puede llegar a ser grave.

c) Sobretensión tipo externo por descarga directa.

Si el rayo cae sobre un conductor de fase por una falta de distanciamiento de los hilos de guarda de la línea o bien porque estos hilos no existen, se originan dos ondas de corriente que parten en direcciones opuestas de valor igual a la mitad de la intensidad del rayo y a dos ondas de tensión cuyo valor depende de la impedancia involucrada. Si dicho valor supera la tensión de ruptura del aislamiento conductor fase-apoyo de la línea, se producirá una falla en

los dos apoyos más próximos al punto de la caída del rayo, provocando dos ondas cortadas de viajarán a lo largo de la línea hasta las subestaciones terminales. Si esta tensión no es superior a la de ruptura, no se producirá falla del aislamiento de la línea.

Puede observarse en la siguiente figura la incidencia de la descarga atmosférica en la mitad del conductor de guarda y otra descarga directa sobre la torre, con sus respectivos porcentajes de drenado a tierra de la corriente producida por el conductor. Si el rayo cae sobre un apoyo, la corriente que circula por la estructura metálica de apoyo a través de su toma de tierra dará origen a la aparición de una tensión importante entre la estructura y los conductores de fase. Esta tensión depende de la intensidad del rayo y de la impedancia que presenta el conjunto apoyo-hilos de guarda-toma de tierra para la onda de frente escarpado correspondiente. Si esta tensión supera el valor de la tensión de ruptura de aislamiento conductor-apoyo, se produce una falla de aislamiento correspondiente, denominado ruptura-inversa.

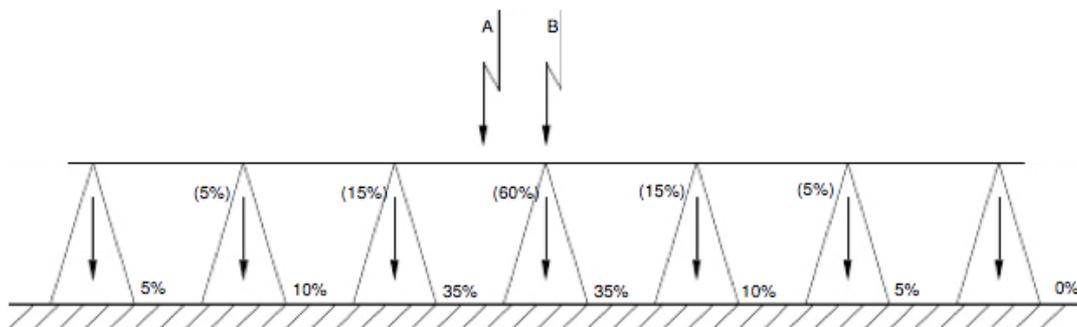


Figura 3.2 El caso A corresponde a la incidencia a mitad del conductor, mientras que B en forma directa a la torre (valores entre paréntesis). Este último la torre deriva a tierra 60% de la corriente.

Sobretensiones del tipo internas.

Son las sobretensiones que se presentan en instalaciones por operaciones, fallas u otros motivos propios de la red, existen dos tipos de sobretensiones: dinámicas y transitorias, las cuales se describen a continuación:

a) Sobretensiones de tipo interno dinámico.

Tienen una duración de segundos y están ligeramente amortiguadas. En este tipo de sobretensión, los valores de tensión son elevados en comparación a la tensión nominal del sistema.

b) Sobretensiones tipo interna transitoria.

Tienen una corta duración y están fuertemente amortiguadas, originadas principalmente por la apertura o cierre de interruptores (switching) con impulsos de maniobra normalizados $250\mu s/2500\mu s$

Descargas atmosféricas.

Desde el punto de vista técnico, el rayo adquiere gran importancia cuando Benjamín Franklin, en el mes de Junio de 1752 pone de manifiesto la electricidad en las nubes al hacer saltar chispas de su célebre cometa; sin embargo, el estudio sistemático del rayo y sus efectos se inicia en el año de 1924 en Suecia, debido, en primer lugar a que el rayo comienza a perturbar las líneas de transmisión de la época. Casualmente en esa misma fecha empieza la aplicación práctica de una de las herramientas más valiosas en su observación y medición, como lo es el osciloscopio de rayos catódicos. Desde entonces la alta tensión dispensa especial cuidado al estudio de todos los fenómenos eléctricos que en una u otra forma afectan a los sistemas de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.

Probabilidad de ocurrencia del rayo con una magnitud (I)

Para los fines de los cálculos del efecto del rayo sobre los sistemas eléctricos, se debe conocer además del número de descargas atmosféricas, la magnitud de la corriente, para lo cual se tienen sistemas de medición que miden las magnitudes de la corriente en KA (kilo ampers) y la frecuencia de ocurrencia, de manera que se puede hacer una distribución probabilística. La medición de las magnitudes se hace por medios indirectos ya que se trata de una tensión de muy alta velocidad (microsegundos) que no puede ser registrada por los métodos tradicionales de medición, de manera que una forma de hacerlo, por medio de una probeta de limadura de hierro que se instala en la parte superior de las torres de transmisión y se conectan al cable de guarda.

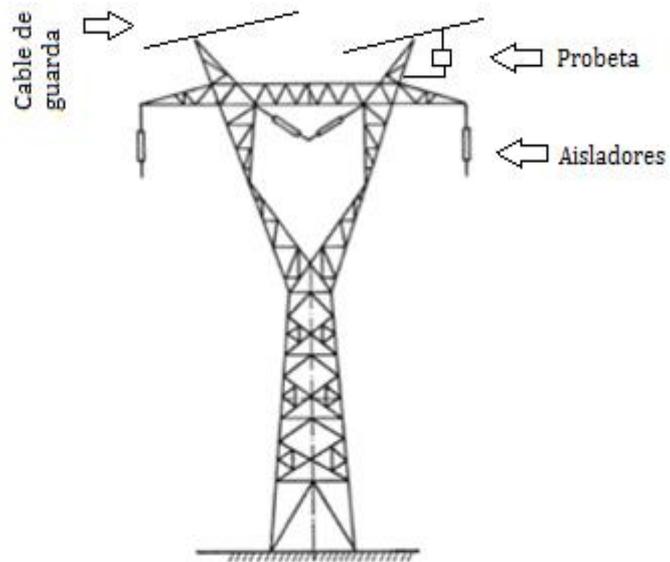


Figura 3.3 ubicación de la probeta en la torre

La mayoría de las corrientes de rayo se determinan en forma indirecta, midiendo en el laboratorio la intensidad de campo magnético (H) que resulta de la circulación de una corriente de magnitud (I).

De manera que aplicando la ley de ampere se puede determinar que corriente circula para un valor dado de H.

$$I = \oint H dt$$

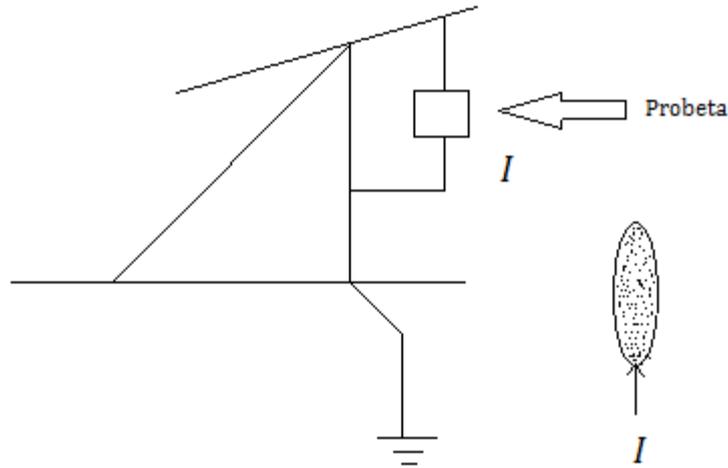


Figura 3.4 Probeta de limadura de hierro

Este método tiene el inconveniente de que como la probeta se debe bajar de la torre con cierta periodicidad, entonces se puede haber presentado más de una descarga y con distintas magnitudes de manera que quedaría registrada la de mayor intensidad.

Debido a estos inconvenientes se emplea, bajo el mismo principio (de efecto de campo magnético) la medición satelital que detecta la concentración de cargas electrostáticas en las nubes y el rayo o descarga subsecuente de manera que indica en base a la concentración de cargas cual corriente se formó.

Para aplicaciones en la protección de los sistemas eléctricos es necesario conocer cuál es la magnitud de la corriente del rayo y cuál es la probabilidad de que ocurra, basándose en los métodos de medición anteriores, se desarrolló para ese campo de trabajo o de ingeniería de IEEE una fórmula empírica como la siguiente.

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \% \quad (3.1)$$

Donde:

$P(I)$ = Probabilidad de ocurrencia del rayo con una magnitud de corriente I

Por ejemplo: La probabilidad de ocurrencia de una corriente de 5KA es:

$$P(5) = \frac{1}{1 + \left(\frac{5}{31}\right)^{2.6}} \times 100 = 99.3\%$$

Si la corriente fuera de 10KA:

$$P(10) = \frac{1}{1 + \left(\frac{10}{31}\right)^{2.6}} \times 100 = 94.98\%$$

Si la corriente fuera de 100KA:

$$P(100) = \frac{1}{1 + \left(\frac{100}{31}\right)^{2.6}} \times 100 = 4.54\%$$

Con esta fórmula se observa que las corrientes del rayo más probables son las de menor valor y las menos probables son las de valor más elevado, a mayor corriente menor probabilidad de ocurrencia, de manera que si se dibuja en un papel probabilístico (escala log-log).

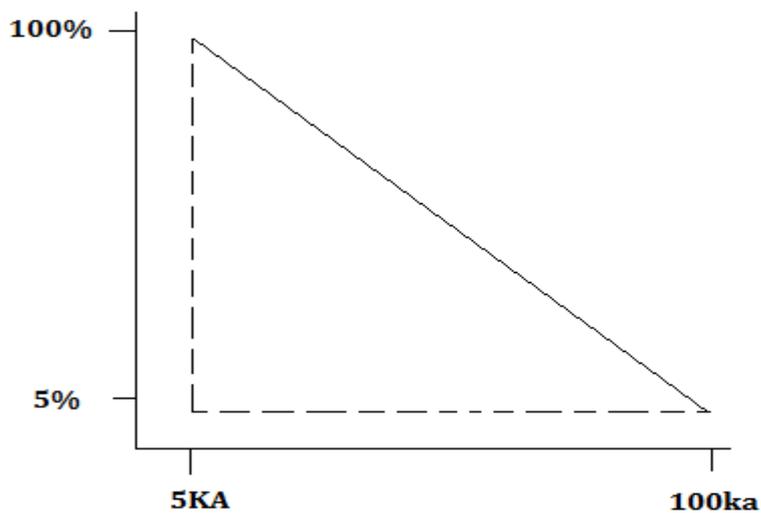


Figura 3.5 Probabilidad de ocurrencia de rayo

La formación del rayo.

La descarga atmosférica conocida como rayo, es la igualación violenta de cargas de un campo eléctrico que se ha creado entre una nube y la tierra o entre nubes.

Los rayos que nos interesan por su efecto, y en éstos se pueden encontrar 4 tipos: 2 iniciados en las nubes y 2 iniciados en tierra, ya que pueden ser positivos o negativos. Los más comunes son de una nube negativa hacia tierra.

Los rayos en las nubes negativas, normalmente aparecen en nubes tormenta que usualmente miden de 3km a más de 50km de largo, y son consecuencia de un rompimiento dieléctrico atmosférico. Este rompimiento una vez iniciado, avanza en zigzag a razón de unos $50m/\mu s$ con descansos de $50\mu s$. Una vez que el rompimiento creó una columna de plasma en el aire, la descarga eléctrica surgirá inmediatamente dentro de un hemisferio de unos 50m de radio del punto de potencial más alto. Y cualquier objeto puede ser el foco de inicio de esta descarga hacia arriba de partículas positivas, aún desde una parte metálica debajo de una torre.

Los rayos consisten usualmente en descargas múltiples, con intervalos entre descargas de docenas a centenares de milisegundos. La primera descarga es la que tiene mayor amplitud, mientras que las subsecuentes tienen tiempo de ataque más rápidos, aunque la velocidad de las descargas se ha encontrado que depende del lugar geográfico. La primera descarga está entre $6 \times 10^7 m/s$ y $15 \times 10^7 m/s$, y la segunda entre $11 \times 10^7 m/s$ y $13 \times 10^7 m/s$.

Las descargas atmosféricas pueden causar grandes diferencias de potencial en sistemas eléctricos distribuidos fuera de edificios o de estructuras protegidas. A consecuencia de ello, pueden circular grandes corrientes en las canalizaciones metálicas, y entre conductores que conectan dos zonas aisladas. Pero, aún sin la descarga, una nube cargada electrostáticamente crea diferencias de potencial en la tierra directamente debajo de ella.

El campo eléctrico debajo de una nube de tormenta es generalmente considerado entre 10kV/m y 30kV/m. Una nube de tormenta promedio podría contener unos 140MW de energía con tensiones de hasta 100MW, con una carga en movimiento intra-nube de unos 40°C. Esta energía es la que se disipa mediante los rayos, con corrientes pico que van de unos cuantos kiloamperes a unos 200KA. Los rayos de una nube positiva hacia tierra contienen más carga que sus contrapartes negativas, por lo que son muy estudiados. En general no exhiben el mismo comportamiento de pasos de los negativos, y suceden más frecuentemente en tormentas invernales con nieve y en latitudes altas. Algunas particularidades aumentan la probabilidad de la caída de rayos en un lugar. Por ejemplo, la frecuencia de descargas en un lugar es proporcional al cuadrado de la altura sobre el terreno circundante. Esto hace que las estructuras aisladas sean particularmente vulnerables. Además, las puntas agudas incrementan también la probabilidad de una descarga.

Teorías de las descargas atmosféricas.

Las descargas atmosféricas presentan problemas para los sistemas de transmisión de la energía eléctrica, la mayoría de los disturbios son debidos a éste fenómeno.

Hay algunas teorías para tratar de explicar su origen y distintos experimentos para estudiar sus efectos.

La nube de tormenta denota una constitución bipolar, en la cual la carga negativa se encuentra espacialmente por debajo de la carga positiva. Acerca de la forma en que se lleva a cabo tal distribución de cargas en la nube, no existe coincidencia de opiniones. Numerosos experimentos con globos sonda han verificado, no obstante, dicha distribución. La mayor parte de éstos, a nivel mundial, fueron conducidos en la década de los 30'as por institutos de física estadounidenses.

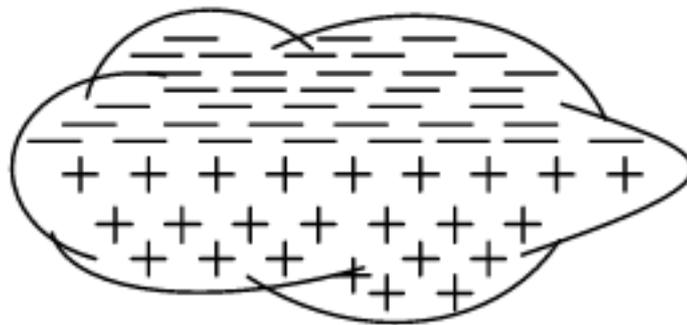


Figura 3.6. Configuración típica de una nube de tormenta.

El gradiente eléctrico.

El valor promedio del gradiente eléctrico, en la proximidad de la Tierra, oscila alrededor de los 5V/m, para incrementarse vertiginosamente en la proximidad de líneas de transmisión a 5kV7m o más y bajo focos de tormenta (15kV/cm).

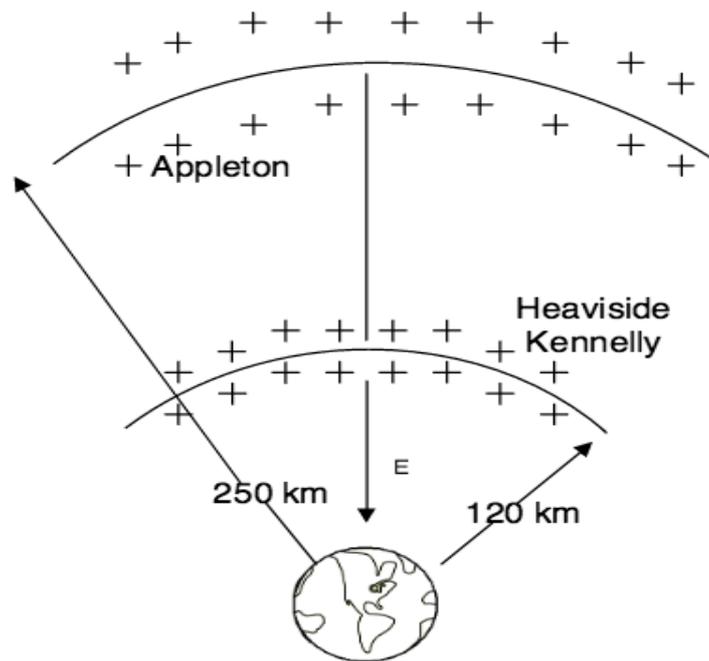


Figura 3.7. Orientación del gradiente eléctrico terrestre.

Teoría de Elster y Geitel.

Esta teoría también se conoce como teoría de la influencia eléctrica. Establece que en la nube se encuentran gotas de diferentes tamaños; las más grandes se precipitan y las más pequeñas son llevadas por el viento hacia arriba. Las gotas polarizan por la acción del campo eléctrico existente, el cual, denota una dirección terrestre. Esto conduce la formación de cargas positivas en la parte inferior de la gota y cargas negativas en la parte superior de la misma. El roce de una gota grande con una gota pequeña, al caer, trae como consecuencia un intercambio de cargas.

En la gota pequeña predomina entonces la carga positiva y en la grande la negativa. Ambas gotas se desplazan en sentido opuesto. En la nube, por consiguiente, se acumulan poco a poco cargas positivas en la parte superior y cargas negativas en su parte inferior. El capo eléctrico que así se forma favorece la separación de cargas por influencia.

Se ilustra en la figura siguiente el pensamiento básico de Elster y Geitel.

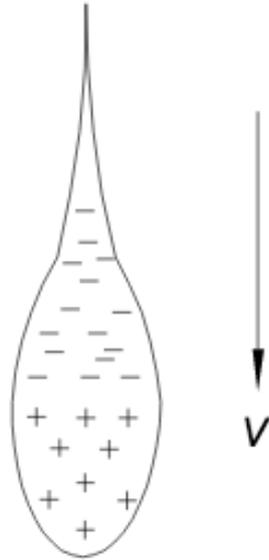


Figura 3.8 Gota de lluvia según Elster y Geitel.

Informaciones recientes le restan importancia a esta teoría, ya que el roce entre gotas parece ser importante sólo en la formación de la lluvia y no en la distribución espacial de las descargas eléctricas.

Teoría de los Cristales de hielo.

Esta teoría explica la importancia que representan los cristales de hielo (granizo), en las partes superiores de las nubes y también en las regiones árticas.

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

Elster y Geitel opinan que la separación de las cargas eléctricas se debe a la fricción entre vapor de agua con granizos o con gotas de agua. Se trata de explicar que en las que no existen precipitaciones pluviales con temperaturas de -10°C ocurran descargas eléctricas en el interior de la nube.

Teoría de Willson.

Conocida también como la ionización de la gota de lluvia esta teoría, asume al igual que la de Elster y Geisel, una influencia del campo eléctrico en la formación de la gota. Wilson

reemplaza la acción de la gota pequeña de la teoría anterior por la acción de los iones, simplificándose así el fenómeno de intercambio de cargas entre las gotas.

En la gota que cae se separan las cargas eléctricas por la acción del campo eléctrico. La parte superior de la gota acusa entonces carga negativa y la inferior carga positiva. El viento, a su vez, arrastra los iones hacia la nube, donde los negativos son atraídos por la carga positiva de la parte inferior de la gota. Los iones positivos son repelidos al mismo tiempo y transportados por el aire hacia la parte superior de la nube, escapando así a la atracción de la mitad superior de la gota, la cual continúa su caída, por consiguiente solo con carga negativa. La nube denota entonces una carga positiva en su mitad superior y una negativa en la inferior.

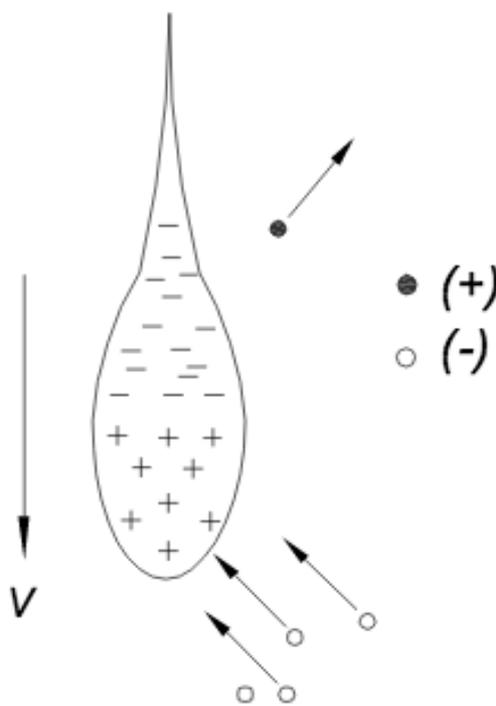


Figura 3.9 Fundamento de la teoría de Wilson.

Esta teoría tropieza con algunas dificultades que se derivan de observaciones prácticas. El tiempo de formación de una carga eléctrica de $1C/km^3$, por la acción de un gradiente eléctrico de $1kV/cm$, asciende a 170min. Para la formación de la tormenta atmosférica esta carga resulta ser muy pequeña y con un tiempo de formación muy largo. Esto le resta importancia a la teoría de Wilson, aunque la misma contribuye a explicar la distribución de cargas eléctricas en la nube.

Teoría de Simpson.

Esta teoría es de amplia aceptación práctica, pues se fundamenta en experimentos llevados a cabo en laboratorios.

Cuando se desintegran gotas de lluvia por la acción de una fuerte corriente de aire las partículas así formadas denotan una carga positiva, y el aire, a su vez, causa la presencia de una gran cantidad de cargas negativas de muy poca masa, y por consiguiente, gran movilidad. En la naturaleza sucede esto cuando la corriente de aire alcanza la velocidad suficiente para desintegrar las gotas de lluvia. La corriente de aire transporta entonces a los iones negativos hacia la parte superior de la nube, donde se reúnen o combinan con las partículas de agua. Las gotas positivas que han sufrido un fraccionamiento también son llevadas hacia arriba por la acción del viento, y cuando éste cesa a determinadas alturas, se unen entre ellas para formar así gotas grandes y caer de nuevo. Al llegar a la zona de vientos fuertes se desintegran otra vez, aumentando así la carga positiva.

En la siguiente se muestra la distribución de cargas en la nube según Simpson, la cual ha podido ser constatada en la práctica con la ayuda de globos sonda. Mientras las partes inferiores de la nube denota una temperatura promedio de $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$, la parte superior alcanza valores de hasta $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$.

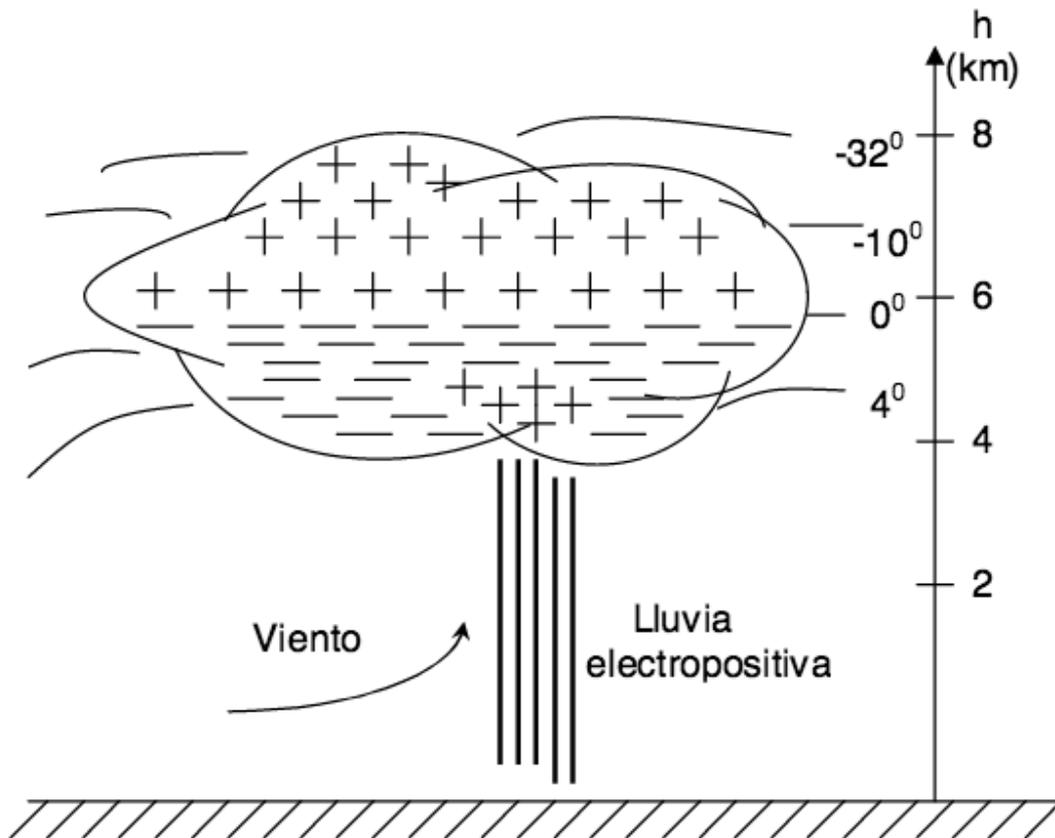


Figura. 3.10 Nube según Simpson con alturas e isotermas usuales.

Estos gradientes térmicos desempeñan, como se verá posteriormente, un papel muy importante al formarse la descarga, ya que de acuerdo con la ley de Paschen favorecen a la descarga con orientación terrestre.

La teoría de Simpson tiene gran ventaja a su favor, ya que puede ser simulada en laboratorios: gotas de aproximadamente 5mm de diámetro se desintegran cuando el viento alcanza velocidades superiores a los 8m/s, obteniéndose una distribución de cargas de cargas parecida a la establecida por Simpson. En la zona donde el viento no alcance esta velocidad crítica no se podrá formar, por consiguiente, la distribución espacial de las cargas señaladas arriba, dificultándose la precipitación.

Según Simpson, las primeras gotas de lluvia de una tormenta denotan comportamiento electropositivo, según se puede verificar fácilmente en los pluviómetros. Estas proceden, casualmente, del foco de tormenta señalado en la anterior figura. Las gotas siguientes denotan ya un carácter electronegativo y sólo en estados avanzados de la tormenta es cuando vuelven

a observarse gotas electropositivas. Se supone que estas provienen entonces de los estratos superiores de la nube.

Existen otras teorías acerca de la formación de la nube de tormenta, entre las cuales resaltan las de R. Gunn (teoría de la condensación), Workman y Reynolds, y otros. En vista de que estas no han adquirido una importancia relevante, como las anteriores, solo se mencionan sin entrar en detalles.

CAPITULO IV

BLINDAJE EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Cables de guarda.

Como ya se mencionó, el elemento más importante en una línea de transmisión son los hilos de guarda.

La tensión (V) que se induce en los conductores de fase, por una descarga atmosférica es la siguiente:

$$V = \frac{Z_c I_c}{2} \quad (4.1)$$

Donde:

Z_c = Impedancia característica de los conductores.

I_c = Corriente de rayo obtenida a partir de la curva de distribución de la corriente de los rayos.

Descargas directas a los cables conductores.

Aún con blindaje, existe una buena probabilidad de que un rayo impacte un hilo conductor de una línea de transmisión, esto puede ser ocasionado por distintos factores, como:

- Magnitud de la descarga
- Topología del terreno
- Diseño del blindaje

El mecanismo de ruptura del aislamiento asociado con la incidencia directa de la descarga en una línea, se designa como “la carga disruptiva en el aislamiento”. Para evaluar los aspectos básicos de este mecanismo se puede considerar el caso elemental de una línea monofásica sin cable de guarda, aislada de tierra por la cadena de aisladores o aisladores de la torre. Una descarga de corriente de impulso de valor pico I_p incide en la línea como se ilustra en la siguiente figura.

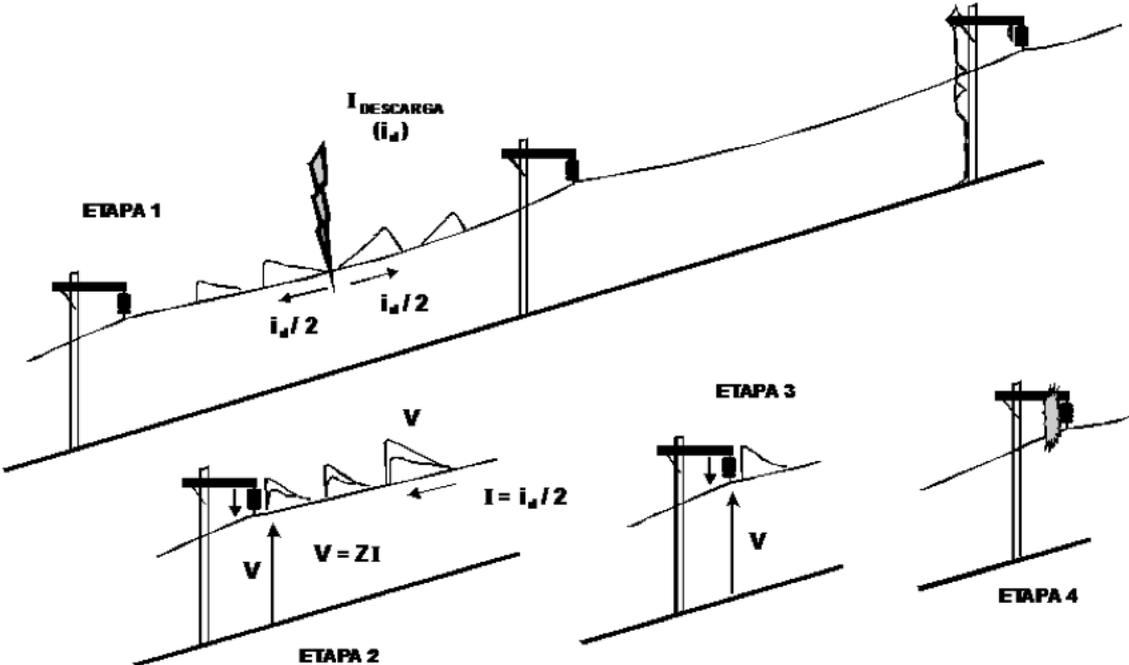


Figura. 4.1 Sobretensión que resulta en una línea no blindada, la cual es alcanzada por un rayo.

De acuerdo a la figura anterior, el valor de sobretensión máximo se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V_p = Z_c I_p \tag{4.2}$$

Donde:

$$Z_c = \text{Impedancia característica de la línea} \quad Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{4.3}$$

I_p = Magnitud pico del rayo

Si el valor de sobretensión sobrepasa el nivel de protección de los aisladores entonces un arco se establecerá siguiendo el contorno del mismo (flameo del aislador) lo cual generalmente causa la pérdida total del aislador o cadena de aisladores.

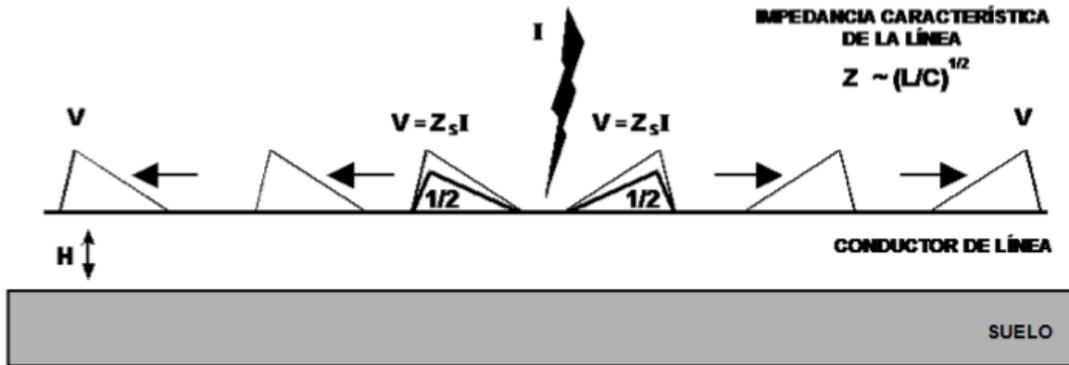


Figura 4.2 Propagación de las ondas de corriente y tensión a lo largo de la línea.

Por lo general se supone que alrededor del 40% de los impactos del rayo se pueden clasificar como descargas en el punto medio del claro y el 60% cae cerca de las torres. La corriente crítica que produce flameo en el punto medio del claro, que exceda al valor I_{CS} , producirá un flameo en la cadena de aisladores en la torre adyacente, este valor de la corriente crítica que produce flameo se obtiene como:

$$I_{CS} = \frac{2V_{CF}}{Z} \quad (4.4)$$

Donde:

V_{CF} = Tensión crítica de flameo o voltaje de 50% de probabilidad de flameo.

Z = Impedancia característica de la línea.

El valor de V_{CF} o $V_{50\%}$ se calcula como:

$$V_{CF} = \frac{NBI}{0.961} \quad (4.5)$$

Aplicando el método conocido como Método de la sombra eléctrica, la línea de transmisión captará todas las descargas atmosféricas dentro de un ancho W dado por la ecuación siguiente, para un tramo de 100km de longitud.

$$A = 0.1W(km^2)$$

Siendo el ancho W :

$$W = b + 4H(m)$$

Donde:

b = Separación entre cables de guarda

$$H = H_g - \frac{2}{3}(H_g - H_{gm}) \quad (4.6)$$

Donde:

H_g = Altura del cable de guarda en la torre (m)

H_{gm} = Altura del cable de guarda en el punto medio del claro

Si la densidad de rayos a tierra en la región es N_g rayos/ km^2 , entonces el índice de salidas de la línea para descargas en el punto medio del claro es:

$$N_{ms} = 0.04N_gWP(I_{CS}) \quad (4.7)$$

Donde:

$P(I_{CS})$ = Probabilidad de exceder la corriente I_{CS}

N_g = Densidad de rayos a tierra.

$$N_g = 0.04DT^{1.25}$$

Donde:

DT = Nivel cerámico.

Los datos anteriores se obtiene de forma más directa de los mapas ceraunicos.

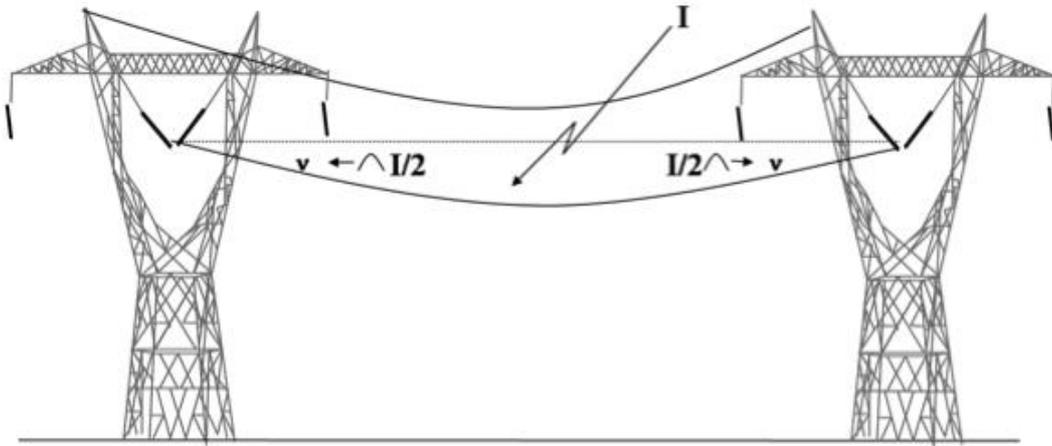


Figura 4.3 Impacto de un rayo en una fase de la línea de transmisión.

$$V = \frac{I}{2} Z_c \quad (4.8)$$

Donde:

Z_c = Impedancia característica del conductor.

I = Corriente del rayo.

La teoría de ondas viajeras supone que la corriente del rayo se divide en dos secciones a partir de su punto de impacto, de manea que el valor es ahora $\frac{I}{2}$ desplazándose en forma unidireccional y produciendo un voltaje en los conductores. Cuando el blindaje falla por estar

deficiente o porque se carece de él, las descargas inciden en los conductores de fase y el voltaje que aparece es:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} [\Omega] \quad (4.9)$$

Z_c = Impedancia característica o aparente de los conductores de fase.

Como la inductancia y la capacitancia son parámetros geométricos, entonces se pueden aplicar fórmulas alternativas como:

$$Z_c = 60 \ln \frac{h_c}{d} [\Omega] \quad (4.10)$$

Donde:

h_c = Altura equivalente del conductor de fase.

d = Diámetro del conductor.

Descargas directas a la torre de transmisión.

La torre en estado estable se mantiene al potencial de la tierra, sin embargo, eleva su potencial en forma inmediata cuando es alcanzada por una descarga atmosférica, este potencial que aparece en la torre está dado como:

$$V_t = IZ_t \quad (4.11)$$

Donde:

V_t = Voltaje en la punta de la torre.

I = Corriente del rayo.

Z_t = Impedancia característica de la torre.

Para estimar el índice de salidas para torres bajas, se usa la corriente crítica I_{ct} en una cadena de aisladores para un valor dado de V_{CF} y se obtiene con la ecuación:

$$N_{tw} = 0.06N_g WP(I_{ct}) \quad (4.12)$$

La onda de voltaje en la punta de la torre V_t se desplaza hacia abajo en la torre hasta que alcanza el punto de transición entre la torre y la tierra circundante que está representada por el valor de la resistencia al pie de la torre R_T . El voltaje se refleja en este punto de transición y viaja de regreso hacia la punta de la torre, iniciándose un proceso de reflexiones sucesivas.

El voltaje que aparece en la cadena de aisladores es la diferencia entre el voltaje en la punta de la torre y el voltaje instantáneo a la frecuencia del sistema.

Descargas a los cables de guarda.

La función de los cables de guarda en las líneas de transmisión es proporcionar un blindaje o protección contra descargas directas, es decir, un blindaje bien diseñado evita las descargas a los conductores de fase como se explicó con anterioridad y está determinado por la posición relativa de los cables de guarda con respecto a los conductores de fase, llamado ángulo de blindaje. En general, se puede establecer que las líneas con dos cables de guarda proporcionan un blindaje más efectivo que aquellos que solo tienen un cable de guarda.

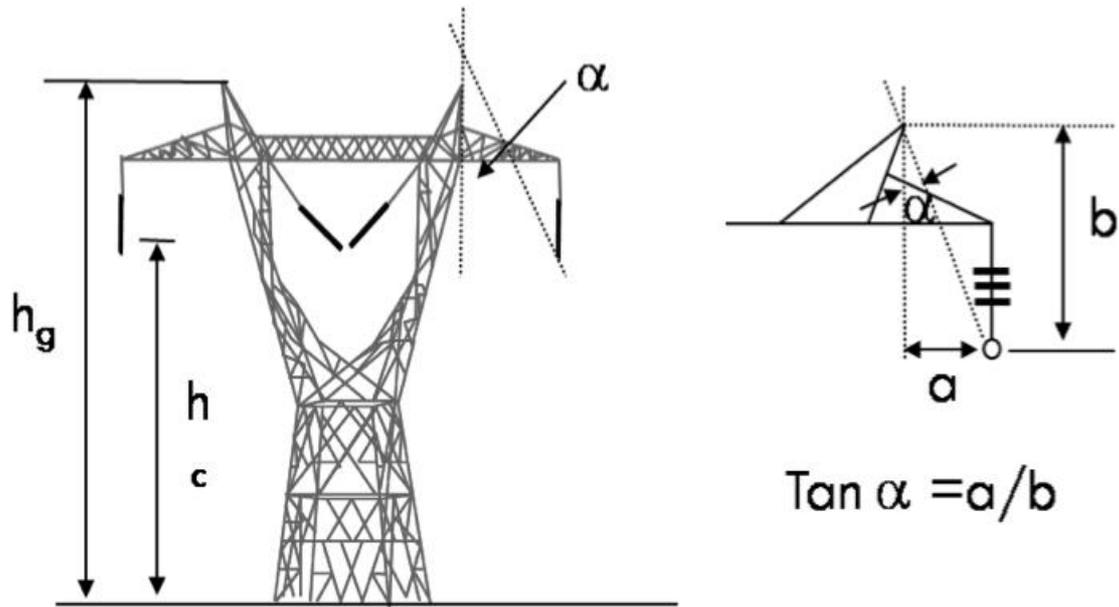


Figura 4.4 Ángulo entre los hilos de guarda y los conductores de las fases externas de la línea.

Debido a que la posición relativa de los conductores de fase y los cables de guarda varían en el punto medio del claro con respecto a la posición de la torre o estructura, entonces el ángulo de blindaje α de la figura anterior se calcula para el punto medio del claro. La altura equivalente del cable de guarda en terrenos planos se calcula como:

$$H = h_g - \frac{2}{3} f_g, \quad (4.13)$$

para los conductores de fase:

$$h_m = h_c - \frac{2}{3} f_c \quad (4.14)$$

Para terreno ondulado:

$$\begin{aligned} H &= h_g \\ h_m &= h_c \end{aligned} \quad (4.15 \text{ a, b})$$

Para terreno montañoso:

$$\begin{aligned} H &= 2h_g \\ h_m &= 2h_c \end{aligned} \quad (4.16 \text{ a,b})$$

b = Separación entre los cables de guarda y el conductor de fase en el punto medio del claro.

$$b = H - h_m \quad (4.17)$$

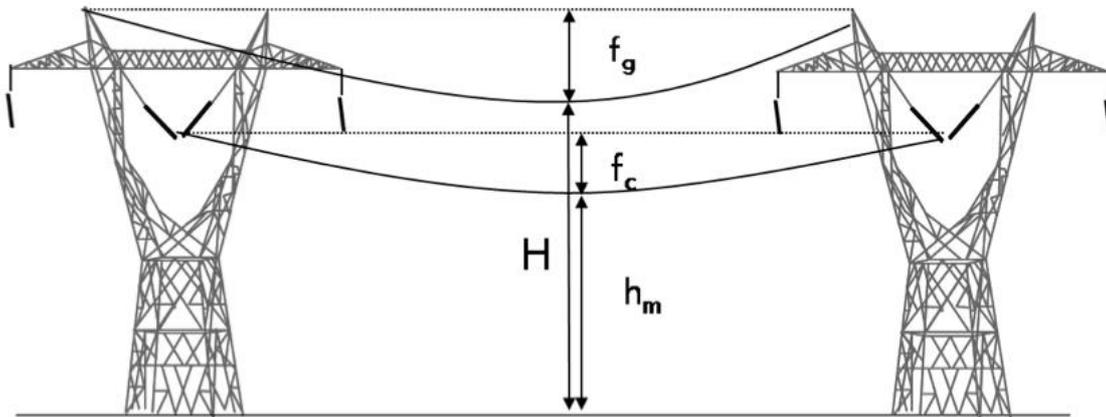


Figura. 4.5 Esquema de valores a considerar para el cálculo de ángulo de blindaje.

El ángulo de blindaje es indicativo de la probabilidad de que un rayo incida sobre los conductores de fase, en general los ángulos de blindaje se relacionan con las alturas de las estructuras (a mayor altura, mayor probabilidad de descarga) y se consideran valores para el cálculo mostrados en la figura anterior, de manera que se establecen las relaciones:

- Para líneas de transmisión del cable de guarda y un $h_g = 25m; 15^\circ$ a 30° , la probabilidad de violar la zona de protección es de $P=40\%$.
- Para líneas de transmisión con dos cable de guarda y un $h_g = 30m; 0^\circ$ a 15° , la probabilidad de violar la zona de protección es de $P=12\%$.

Cuando ocurren las descargas en los cables de guarda, la onda de voltaje que se desplaza por efecto de la capacitancia entre el cable de guarda y el conductor de fase y de conductor de fase a tierra, produce un efecto de acoplamiento por campo eléctrico, de manera que se induce un voltaje en los conductores de fase

La magnitud de este voltaje depende del valor del factor de acoplamiento C . El valor de este factor de acoplamiento C depende del número de cables de guarda en la línea y de la posición relativa de éstos con respecto a los conductores de fase.

Factor de acoplamiento para líneas con un cable de guarda.

Las líneas de transmisión con un cable de guarda presentan un blindaje más deficiente que cuando se usan dos cables de guarda, en términos generales; sin embargo, las ondas que inciden sobre este cable inducen un voltaje en todas las fases de los conductores que conducen la potencia. El valor del factor de acoplamiento cambia para cada conductor de fase dependiendo de su posición,

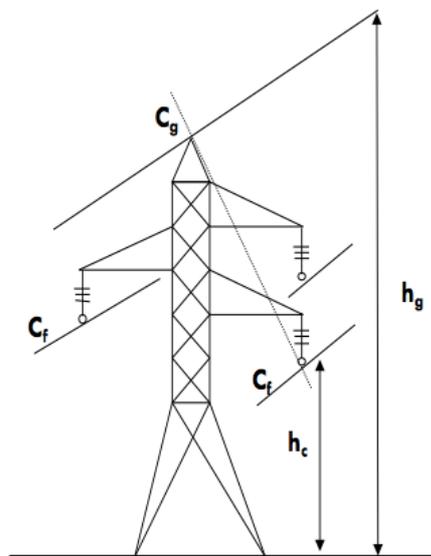


Figura. 4.6 Torre con un solo cable de guarda.

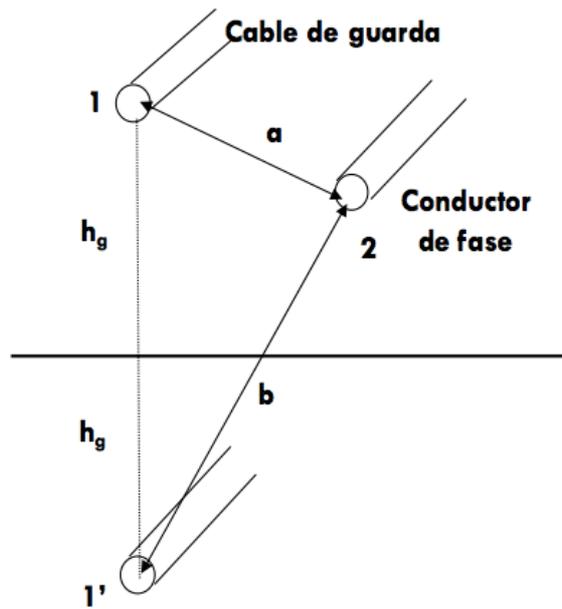


Figura. 4.7 Esquema con un solo cable de guarda.

Donde:

1 = Cable de guarda

1' = Imagen del cable de guarda

2 = Conductor de fase

a = Distancia del cable de guarda al conductor de fase

b = Distancia del conductor de fase a la imagen del cable de guarda

Mediante la siguiente expresión se puede sacar el factor de acoplamiento:

$$C = \frac{\log \frac{b}{a}}{\log \frac{2h_g}{r}} \quad (4.18)$$

El factor de acoplamiento para líneas de transmisión con dos cables de guarda.

La mayoría de las líneas de transmisión por razones de protección efectiva contra descargas atmosféricas, usan cables de guarda, cuando estos dos cables de guarda se encuentran en un ángulo negativo respecto a los conductores de fase se obtiene una mejor protección, por lo tanto, es un blindaje más eficiente.

En este caso se usan dos cables de guarda, se supone que la onda de corriente del rayo se induce en partes iguales en cada conductor de guarda y el factor de acoplamiento se calcula para cualquiera de los conductores de fase, como una resultante de las ondas en los cables de guarda.

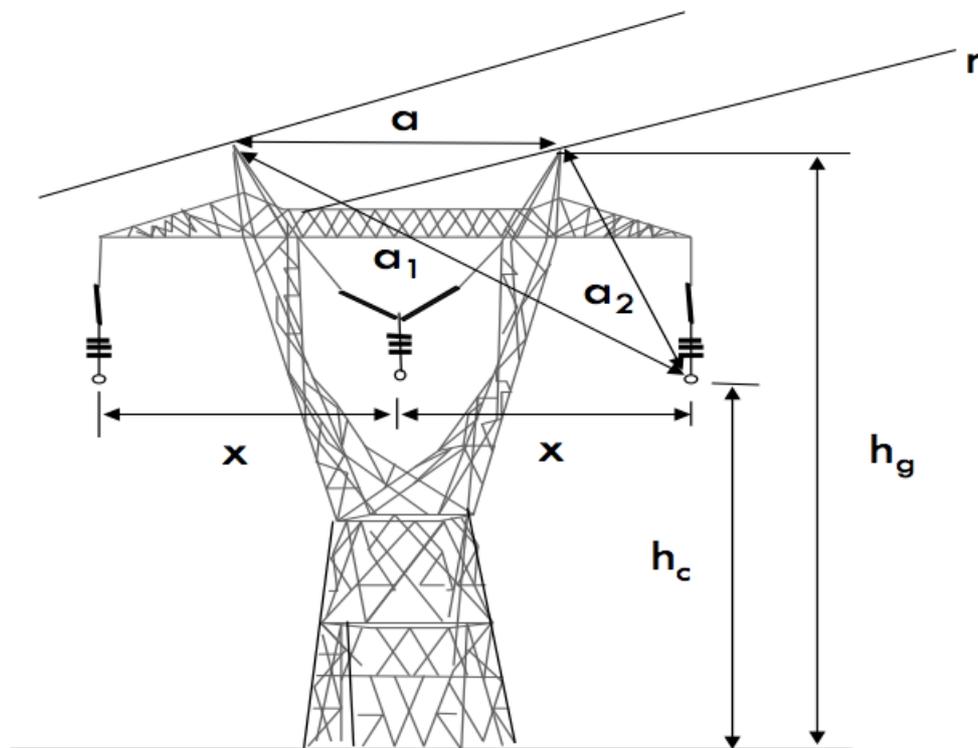


Figura. 4.8 Torre con dos cables de guarda.

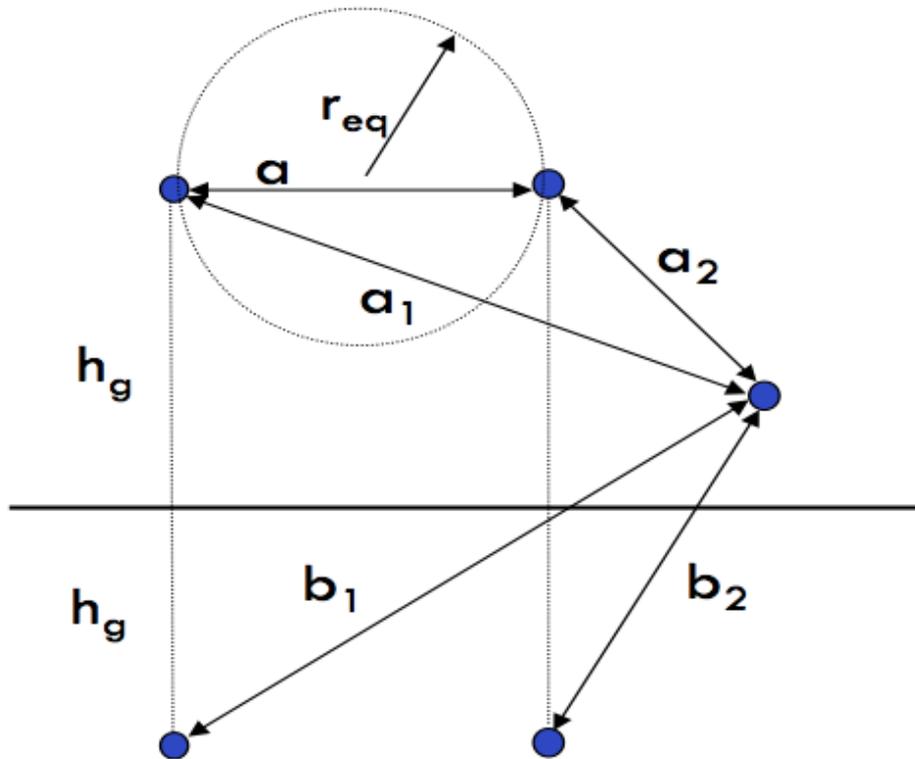


Figura. 4.9 Esquema con dos cables de guarda.

Donde:

r = Radio del cable de guarda

r_{eq} = Radio equivalente en los dos cables de guarda

a = Separación entre cables de guarda

h_g = Altura del cable de guarda sobre el nivel del suelo

Descargas atmosféricas sobre los cables de guarda.

La función de los cables de guarda es evitar aquellas descargas atmosféricas impacten directamente a los conductores de fase, de manera que un blindaje bien diseñado atrae las descargas atmosféricas, sin embargo el hecho de que las descargas incidan sobre los cables de guarda no evita que se presenten tensiones inducidas en los conductores de fase por efecto electromagnético, de manera que estas tensiones pueden adquirir valores

importantes que supere el aislamiento en aire proporcionado por la cadena de aisladores que soportan a los conductores de fase.

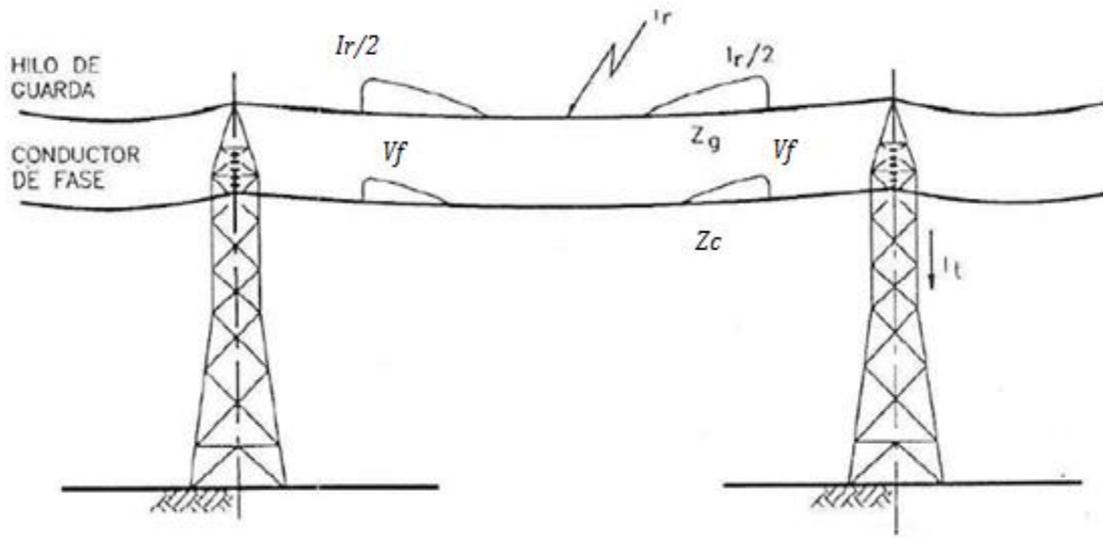


Figura 4.10 Descarga atmosférica sobre el cable de guarda

Para una descarga de magnitud I que se impacta en los cables de guarda aparece un voltaje en ellos, cuyo valor es:

$$V_g = \frac{(Z_g)(I)}{2} \quad [KV] \quad (4.19)$$

Donde:

Z_g =impedancia característica del cable de guarda (Ω)

Para obtener el valor de Z_g se utiliza la siguiente expresión:

$$Z_g = 60 \left(\ln \frac{2(h_g)}{r} \right) \quad (4.20)$$

Siendo:

h_g =Altura del cable de guarda

r =radio del cable de guarda

El valor de la tensión inducida en los cables de fase se obtiene utilizando la siguiente ecuación:

$$V_f = C(V_g) \quad [KV] \quad (4.21)$$

Siendo:

V_f =Tensión inducida en los cables de fase

V_g =Tensión inducida en el cable de guarda

C= Coeficiente de acoplamiento

El coeficiente de acoplamiento (C) se calcula dependiendo de la configuración simétrica de los cables de guarda y los conductores de fase. Esta configuración cambia según tenga la línea 1 o 2 cables de guarda.

El valor de C se encuentra entre 0.2 y 0.3, los valores más bajos para líneas con un cable de guarda y los más altos para líneas con dos cables de guarda.

Ejemplo:

Calcular el valor de la tensión inducida en los conductores de fase de una línea de transmisión de 115 KV con cable de guarda de 5/8 pulgada de diámetro a una altura de 23 m. La línea está construida en un terreno plano y usa un conductor por fase de 477kcm con un diámetro de 1.60 cm en ACSR.

Se supone que la línea es impactada por una corriente $I=10$ KA el claro de la línea es de 250 m y la flecha se puede tomar como el 1% del claro.

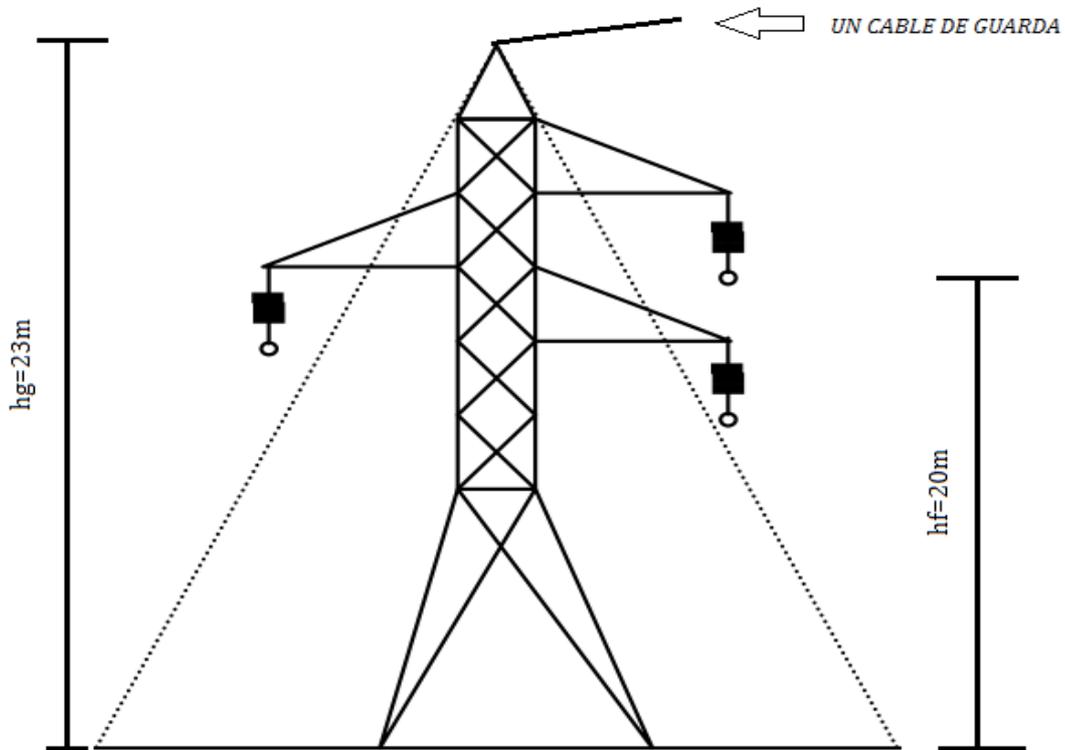


Figura 4.11 Características de la torre para determinar la tensión inducida

Para obtener el valor de la tensión inducida en el cable de guarda primero se debe obtener la impedancia característica del cable de guarda.

$$Z_g = 60 \left(\ln \frac{2(h_g)}{r} \right) \quad (4.22)$$

Debido a que el diámetro del cable de guarda esta dado en pulgadas se tiene que convertir a centímetros.

$$d = \frac{5}{8}(2.54) = 1.5875 \text{ cm} \implies r = \frac{d}{2} = \frac{1.5875}{2} = 0.7937$$

Sustituyendo los valores en la ecuación de la impedancia característica:

$$Z_g = 60 \left(\ln \frac{2(2300)}{0.7937} \right) = 519.89 \Omega$$

La tensión inducida en el cable de guarda es:

$$V_g = \frac{Z_g(I)}{2} = \frac{(519.89)(10)}{2} = 2599.45 \text{ KV} \approx 2600 \text{ KV}$$

Como se trata de una línea de un conductor por fase con un solo cable de guarda se puede considerar el coeficiente de acoplamiento $C=0.2$

Por lo tanto el valor de la tensión inducida en el conductor de fase es:

$$V_f = C(V_g) = (0.2)(2600) = 520 \text{ KV}$$

Este valor aparece en la fase superior que es la más cercana al cable de guarda, para los conductores de las fases inferiores, la tensión inducida es menor.

El caso critico de tensión que aparece en los conductores de fase, corresponde a la suposición de la tensión inducida con la tensión máxima de operación (antes de la descarga) que es:

$$V_{op} = \frac{V_{max}}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} \quad [\text{valor pico}] \quad (4.23)$$

Para 115 KV la tensión máxima de operación (diseño) es 123 KV por norma.

$$V_{op} = \frac{123 \text{ KV}}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} = 100.42 \text{ KV}$$

La tensión máxima en el conductor de fase es:

$$V_f^1 = V_f + V_{op} \quad (4.23)$$

$$V_f^1 = V_f + V_{op} = 520 + 100.42 = 620.42 \text{ KV}$$

Si el blindaje de la línea falla (no opera correctamente) la tensión que aparece en el conductor de fase es:

$$V_f = \frac{Z_c(I)}{2} \quad (4.24)$$

Donde:

$$Z_f = 60 \left(\ln \frac{2(h_t)}{r} \right) \quad (4.25)$$

En este caso también se toma como referencia al conductor más alto, que para este ejemplo se supondrá que se encuentra a 20m de altura en un terreno plano:

$$h_t = h_c - \frac{2}{3}f \quad [\text{terreno plano}]$$

$$f = 1\% \text{ del claro} \implies f = (0.01)(250) = 2.5m$$

$$h_t = 20 - \left(\frac{2}{3}\right)(2.5) = 18.33m$$

Por lo tanto:

$$Z_f = 60 \left(\ln \frac{(2)(1833)}{\frac{1.60}{2}} \right) = 505.79 \approx 560\Omega$$

$$V_f = \frac{Z_f(I)}{2} = \frac{(506)(10)}{2} = 2530KV$$

Como se puede observar al fallar el blindaje de la línea la magnitud de la tensión inducida en el conductor de fase aumenta considerablemente.

Cable de guarda tipo OPGW

El cable de guarda tipo OPGW es un cable utilizado para transportar señales eléctricas de alta frecuencia que posee dos conductores concéntricos, uno central, llamado vivo, y uno exterior, de aspecto tubular, llamado malla o blindaje, que sirve como referencia de tierra y retorno de las corrientes. Entre ambos se encuentra una capa aislante llamada dieléctrico, de cuyas características dependerá principalmente la calidad del cable. Todo el conjunto suele estar protegido por una cubierta aislante. Es también conocido como fibra óptica.

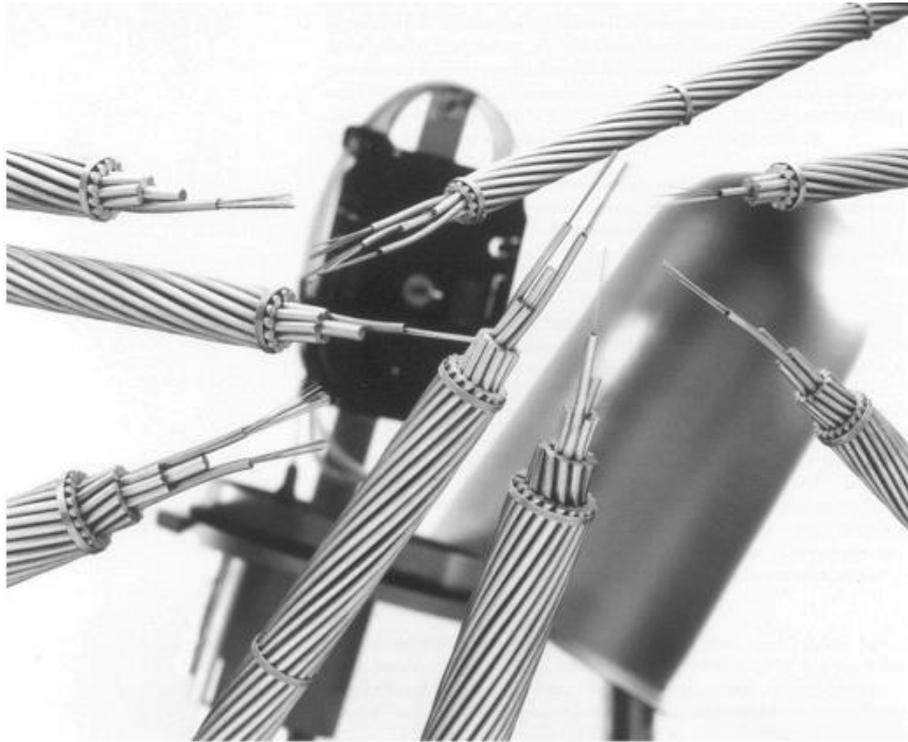


Figura. 4.12 Cable de guarda con fibra óptica.

El conductor central puede estar constituido por un alambre sólido o por varios hilos retorcidos de cobre; mientras que el exterior puede ser una malla trenzada, una lámina enrollada o un tubo corrugado de cobre o aluminio. En este último caso resultará un cable semi-rígido.

Debido a la necesidad de manejar frecuencias cada vez más altas y a la digitalización de las transmisiones, en años recientes se ha sustituido paulatinamente el uso del cable de guarda convencional por el cable de guarda de fibra óptica, en particular para distancias de varios kilómetros, porque el ancho de banda del OPGW es muy superior, por eso es de alta importancia para el control de todo el sistema eléctrico nacional, ya que es la llave de la comunicación para las redes eléctricas, además, como se menciona, tiene la misma función que un cable de guarda convencional, una de las diferencias es que el cable OPGW tiene un valor mas elevado al cable de guarda convencional.

La fibra óptica u OPGW se emplea como medio de transmisión para las redes de telecomunicaciones, ya que por su flexibilidad los conductores ópticos pueden agruparse formando cables, estas pueden ser de plástico o de vidrio.

Su funcionamiento se basa en transmitir por el núcleo de la fibra un haz de luz, tal que este no atraviese el revestimiento, sino que se refleje y se siga propagando. Esto se consigue si el índice de refracción del núcleo es mayor al índice de refracción del revestimiento, y también si el ángulo de incidencia es superior al ángulo límite.

Cada filamento consta de un núcleo central de plástico o cristal (óxido de silicio y germanio) con un alto índice de refracción, rodeado de una capa de un material similar con un índice de refracción ligeramente menor. Cuando la luz llega a una superficie que limita con un índice de refracción menor, se refleja en gran parte, cuanto mayor sea la diferencia de índices y mayor el ángulo de incidencia, se habla entonces de reflexión interna total.

En el interior de una fibra óptica, la luz se va reflejando contra las paredes en ángulos muy abiertos, de manera que prácticamente avanza por su centro. De este modo se pueden guiar las señales luminosas sin pérdidas por largas distancias.

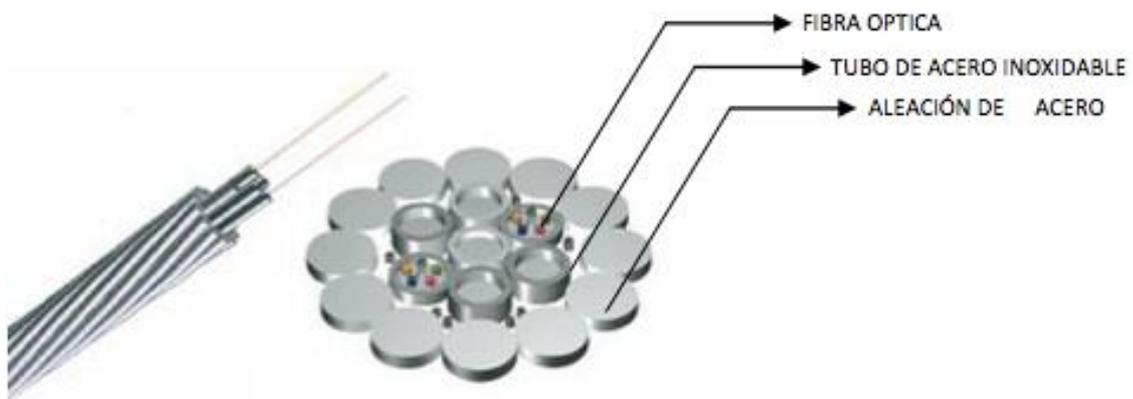


Figura. 4.13 Partes constitutivas del cable de guarda tipo OPGW

EL VOLTAJE EN LA PUNTA DE LA TORRE Y EN LA CADENA DE AISLADORES.

Cuando se usan líneas de transmisión con cable de guarda, la función de estos es capturar los rayos y conducirlos a tierra, en donde en teoría se debe disipar dependiendo de algunos factores como son la resistencia al pie de la torre, la inductancia de la estructura de la torre y la impedancia equivalente en los cables de guarda.

Para estudiar estos conceptos se uso un circuito elemental para las torres como el mostrado en la figura.

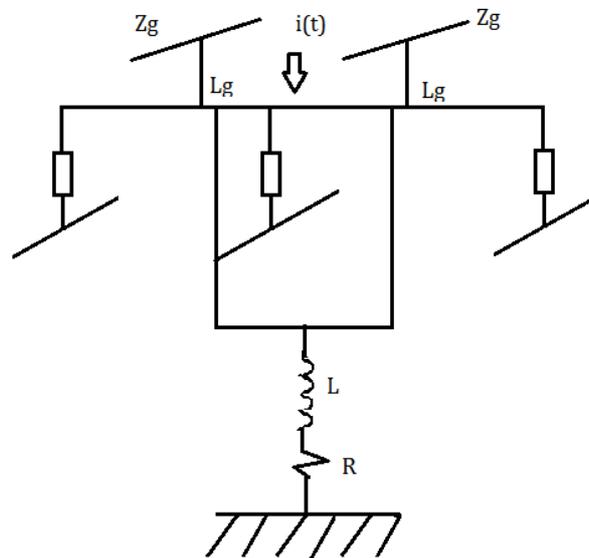


Figura 4.14 circuito elemental para la torre

Donde:

L_g = Cables de guarda

Z_g = Impedancia característica del cable de guarda

L = Inductancia de la torre [μ H]

R = Resistencia al pie de la torre [Ω]

$i(t)$ = Corriente del rayo [KA]

El circuito resistivo de la estructura anterior es el siguiente:

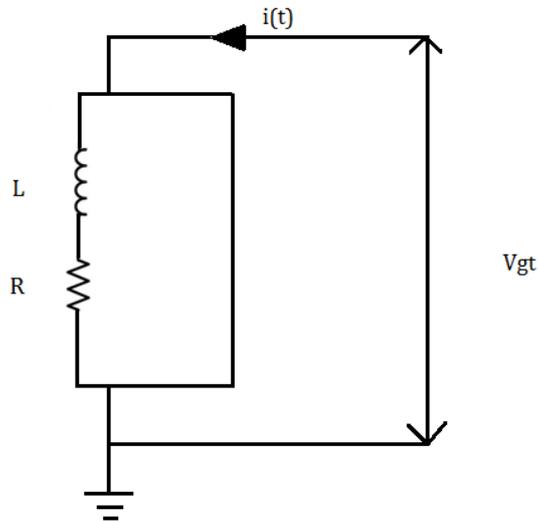


Figura. 4.15 Circuito resistivo de la estructura

V_{gt} = Voltaje de tierra a la punta de la torre.

El equivalente de la impedancia característica de los cables de guarda, que en este caso son dos, es:

$$Z = \frac{V_{gt}}{4} \quad (4.26)$$

Cuando la corriente del rayo impacta la torre se conduce a tierra de manera que hay una impedancia equivalente en paralelo con los cables de guarda (Z_g) y la resistencia al pie de la torre (R).

$$\frac{(Z)(R)}{Z+R} \quad (4.27)$$

La caída de tensión a través de estas impedancias equivalentes es:

$$\frac{(Z)(R)}{Z+R} (i(t)) \quad (4.28)$$

Cuando la corriente del rayo llega a tierra entonces se refleja una parte y otro se transmite (se disipa en la tierra) la onda reflejada del rayo depende del coeficiente de reflexión (Γ) y se calcula como:

$$\Gamma = \frac{Z-R}{Z+R} \quad (4.29)$$

Esta onda reflejada produce una tensión con la inductancia de la torre cuyo valor es:

$$(\Gamma)(L \frac{di}{dt}) = \frac{Z-R}{Z+R} (L \frac{di}{dt}) \quad (4.30)$$

El valor $\frac{di}{dt}$ se conoce como "índice de derivación" de la corriente del rayo y su valor es:

$$\frac{di}{dt} = 40 \text{ KA}/\mu\text{s}$$

Para torres hasta de 40m de altura, la inductancia se toma como:

$$L = 20\mu\text{H}$$

De manera que el voltaje en la punta de la torre se determina como:

$$V_{gt} = \frac{(R)(Z)}{R+Z} i(t) + \left(\frac{Z-R}{Z+R}\right) L \left(\frac{di}{dt}\right) \quad [\text{KV}] \quad (4.31)$$

Por ejemplo para una línea de transmisión de 230 KV, si es impactada por una corriente del rayo de 10 KA y el valor calculado de la impedancia característica de los cables de guarda $Z_g=400\Omega$ y se tiene una resistencia al pie de la torre de 30Ω . el voltaje instantáneo de la punta de la torre a tierra es:

$$Z = \frac{Z_g}{4} = \frac{400}{4} = 100\Omega$$

Datos:

$$L = 20\mu\text{H}$$

$$\frac{di}{dt} = 40 \text{ KA}/\mu\text{s}$$

$$V_{gt} = \left[\frac{(30)(100)}{30 + 100} \right] 10 + \left(\frac{100 - 30}{100 + 30} \right) (40)(20) = 661.53 \text{KV}$$

EL VOLTAJE EN LA CADE NA DE AISLADORES

Cuando la corriente del rayo impacta los cables de guarda entonces se conduce a tierra a través de la estructura de la torre, pero la circulación de esta corriente a través de los cables de guarda induce una tensión en las fases debido al factor de acoplamiento (C) de manera que el valor de la onda reflejada en el terreno y el inducido se superponen en el instante de la caída del rayo, se puede presentar una sobretensión en la cadena de aisladores de la línea que tenga un valor superior resistente (NBI) y entonces se produzca un arco eléctrico entre la trabe de la torre y el conductor de fase.

Este arco eléctrico se le conoce por la característica de ir de trabe a conductor (tierra-conductor) como "flameo inverso" para evitar que esto ocurra y tomar las medidas correctivas apropiadas, se debe calcular el voltaje que aparece en la cadena de aisladores por esta superposición de tensión,

Vais= Voltaje en la cadena de aisladores

C= Coeficiente de acoplamiento entre el cable de guarda y el conductor de fase

R= Resistencia al pie de la torre

El voltaje que aparece en la cadena de aisladores cuando la línea es impactada por una corriente de rayo en condiciones de operación normal (transporta corriente de fase) se obtiene mediante la siguiente expresión que toma en cuenta los valores de la reflexión de onda:

$$V_{ais} = \frac{RZ}{R+Z} (i(t)) - C \frac{RZ}{R+Z} (i(t)) + \left(\frac{Z-R}{Z+R} L \frac{di}{dt} \right) - \left(C \frac{Z-R}{Z+R} \right) \left(L \frac{di}{dt} \right) \pm V_{fn} \quad (4.32)$$

(a) (b) (c) (d) (e)

Los términos de la ecuación anterior son los siguientes:

- a) Componentes resistivos de las caídas de voltaje
- b) Componentes inductivos para la caída de resistencia debida al acoplamiento del cable de guarda
- c) Componentes inductivos de la caída de voltaje y cuyo valor depende del índice de elevación de la corriente del rayo $\left(\frac{di}{dt} \right)$
- d) Componentes inductivos de la caída de voltaje
- e) Voltaje de fase a neutro de la tensión máxima de operación de la línea en el momento de la descarga

Normalmente se puede calcular con mayor frecuencia, en la corriente del rayo que pueda producir flameo inverso en la cadena de aisladores, para esto se parte de la consideración que la tensión que tiene una probabilidad de 10% de flameo en la línea, y es el valor del nivel básico de aislamiento al impulso (NBI) de manera que si se despeja la corriente del rayo $i(t)$ de la ecuación para el voltaje en la cadena de aisladores se tiene:

$$i(t) = V_{ais} \left(\frac{R+Z}{RZ(1-c)} \right) - \left(\left(\frac{Z-R}{RZ} \right) L \frac{di}{dt} \right) \pm \left(\frac{R+Z}{RZ(1-c)} V_{fn} \right) \quad (4.33)$$

Ejemplo:

Calcular la corriente del rayo que puede producir flameo inverso en una línea de transmisión de 230 KV que tiene las siguientes características:

$$Z_g = 400 \Omega$$

$$C = 0.25$$

$$L = 20 \mu H$$

$$\frac{di}{dt} = 40 \text{ KA} / \mu s$$

Para los siguientes casos

- a) Con $R=20\Omega$
- b) Con $R=10\Omega$

Para una tensión de 230 KV de tabla de datos la tensión básica es de 245KV y
NBI=1050KV

Tabla (5.1) NBI para diferentes niveles de tensión

TENSIÓN NOMINAL (KV)	TENSIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN	NIVEL BASICO DE AISLAMIENTO AL IMPULSO (NBI)
115	123	550
230	245	1050 Ó 900
400	420	1425 Ó 1300

$$V_{FN} = \frac{245}{\sqrt{3}} = 141.45KV$$

El valor pico de esta tensión

$$V_{FN} = \sqrt{2}(V_{FN}) = (\sqrt{2})(141.45) = 200.04KV$$

Impedancia equivalente Z

$$Z = \frac{Z_g}{4} = \frac{400}{4} = 100\Omega$$

Para el caso (a)

$i(t)$

$$= 1050 \left(\frac{20 + 100}{(20)(100)(1 - 0.25)} \right) - \left(\frac{100 - 20}{(100)(20)} \right) (20)(40) \\ + \left(\frac{20 + 100}{(20)(100)(1 - 0.25)} \right) (200) = 68KA$$

La probabilidad de ocurrencia de esta corriente de rayo es:

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{68}{31}\right)^{2.6}} = 0.1148 \rightarrow 11.48\%$$

Para el caso (b)

$$\begin{aligned}
i(t) &= 1050 \left(\frac{10 + 100}{(10)(100)(1 - 0.25)} \right) - \left(\frac{100 - 10}{(100)(10)} \right) (20)(40) \\
&+ \left(\frac{10 + 100}{(10)(100)(1 - 0.25)} \right) (200) = 147.3 \text{KA}
\end{aligned}$$

La probabilidad de ocurrencia de esta corriente de rayo es:

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{147.3}{31}\right)^{2.6}} = 0.017 \rightarrow 1.7\%$$

Es decir que a menor valor de resistencia al pie de la torre la probabilidad de flameo inverso es menor ya que la corriente que se requiere para esto es mayor. Esta es la razón por la que la resistencia al pie de la torre (R) de las líneas de transmisión se debe diseñar con valores inferiores a 10Ω .

Apartarrayos

Las líneas de transmisión que tienen un número elevado de salidas por efecto de las descargas atmosféricas, por lo general están localizadas en regiones que tienen un nivel cerámico significativo (alta densidad de rayos a tierra). Las descargas directas en la mayoría de los casos son producidas por una deficiencia en el blindaje proporcionado por los cables de guarda, y las descargas indirectas, normalmente están asociadas a una elevada resistencia o impedancia al pie de la torre, es decir, una conexión a tierra inadecuada.

El problema de la conexión a tierra muchas veces no tiene una solución satisfactoria cuando la resistividad del suelo es muy elevada.

Pero hay un dispositivo que tiene potencial conectado a tierra, y es un dispositivo que ayuda a limitar una sobretensión; son los apartarrayos que se instalan en paralelo con la cadena de aisladores y se busca con esto mejorar el desempeño de las líneas que tienen altos índices de salidas, o bien, en los casos en que se considere en la etapa de proyecto, con conocimiento del perfil de la línea, sus características nivel cerámico, etc. Para

prevenir las condiciones operativas futuras y que se tenga una mejor continuidad en la transmisión de energía eléctrica.

Esta técnica en la práctica ha mostrado ser más eficiente que los métodos clásicos de corrección del ángulo de blindaje o la redefinición del proyecto de conexión a tierra. Los métodos clásicos muchas veces son inviables para ciertas condiciones del terreno, con alta resistividad del suelo. El uso actual de apartarrayos de línea se desprende de dos factores básicos: La fabricación de apartarrayos de óxido metálico, y el encapsulamiento con materiales poliméricos más ligeros y sin un gran impacto de peso en las estructuras de las torres.

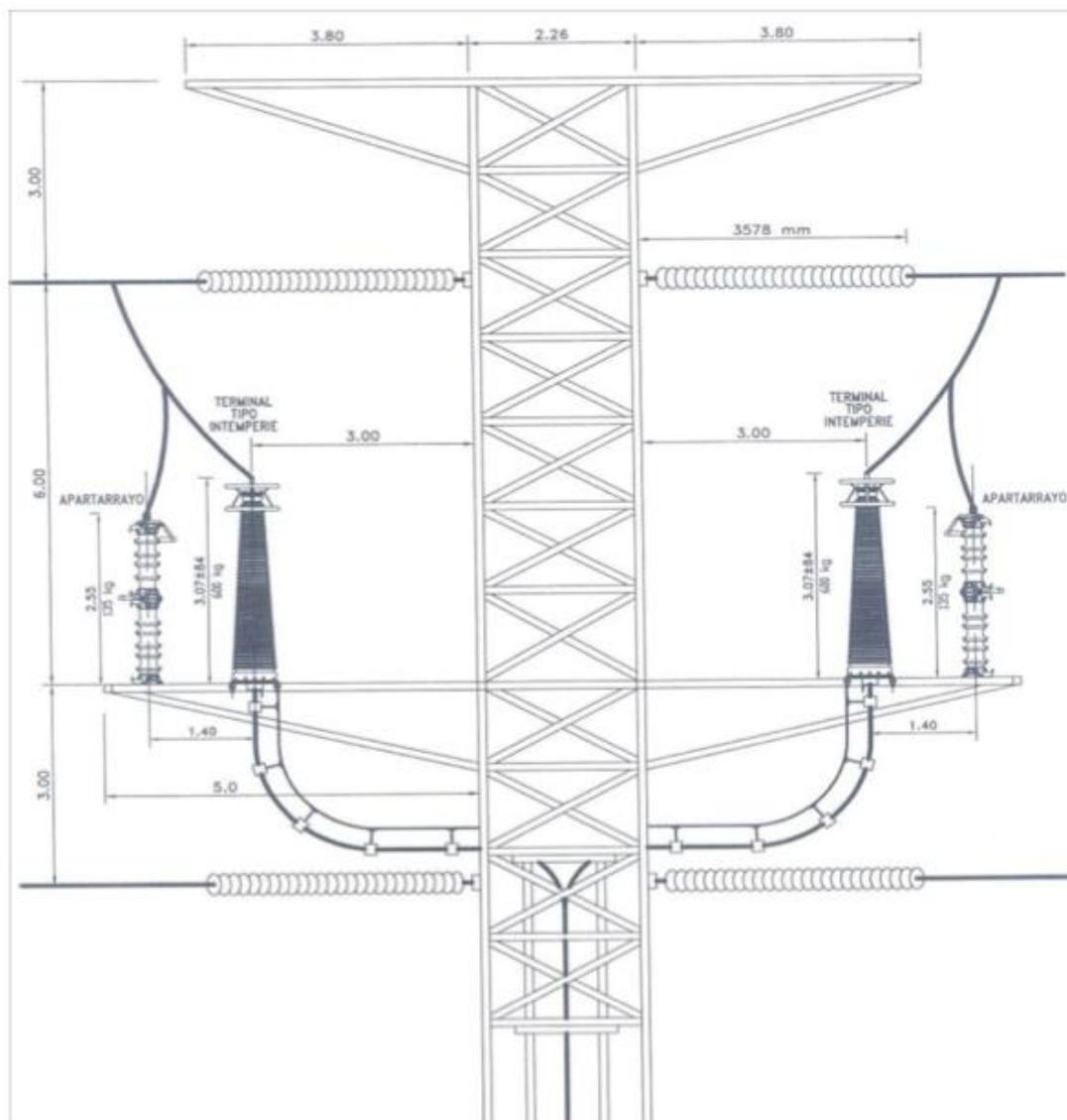


Figura 4.16 Montaje de apartarrayos en la cruceta de una torre.

La función del apartarrayos no es eliminar las ondas de sobretensión presentadas durante las descargas atmosféricas, sino limitar su magnitud a valores que no sean perjudiciales para las máquinas del sistema.

Las descargas estáticas producen en los conductores una onda de sobretensión viajera en los dos sentidos. Cuando esta onda llega a una discontinuidad en el circuito, que puede ser un ramal sin uso, la onda de voltaje se refleja y en ciertos lugares puede llegar a ser de hasta el doble de la amplitud original. Por lo anterior, los apartarrayos, que son aparatos eléctricos que dirigen a tierra las sobretensiones, deben colocarse uno por fase y lo más cerca posible del equipo a proteger, para ser mayor su efectividad.

El apartarrayos se encuentra conectado permanentemente en el sistema, opera cuando se presenta una sola retención de determinada magnitud, descargando la corriente a tierra. Las partes constitutivas de un apartarrayos se muestran en la siguiente figura:

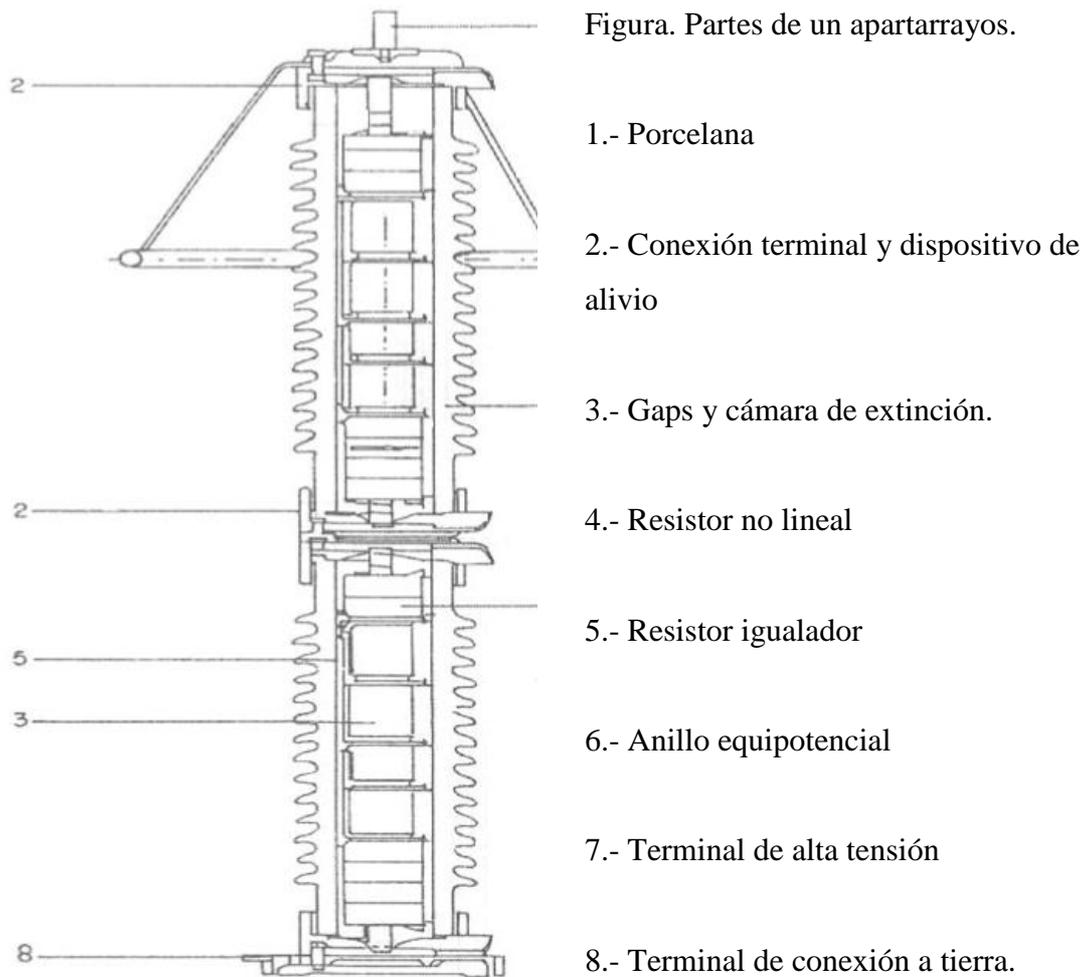


Figura 4.17

Apartarrayos de óxido metálico.

En las últimas décadas se observó un incremento en el uso de los apartarrayos de óxido metálico en sistemas de alta tensión y actualmente para su aplicación y de acuerdo con la forma en cómo se conecta a la línea, pueden ser:

- a) Conectados en forma directa y permanente.
- b) Conectados a través de un entrehierro (gap) en serie.



Figura. 4.18 Partes constitutivas de un apartarrayos de óxido metálico.

Selección de apartarrayos.

La selección de un apartarrayos para la protección contra sobretensiones de origen atmosférico y por maniobra de interruptores debe estar de acuerdo con el criterio de protección establecido.

Las características importantes para la selección de apartarrayos son:

- a) Tensión nominal de los apartarrayos.

Es el valor efectivo de la tensión alterna de frecuencia fundamental (60Hz) a la cual se efectúa la prueba de trabajo, y que puede aparecer en forma permanente en el apartarrayos sin dañarlo. A esta tensión el apartarrayos extingue la corriente de frecuencia fundamental, por lo que se conoce también como “tensión de extinción del apartarrayos”.

La tensión nominal del apartarrayos se calcula con la expresión:

$$V_n = K_e V_{\max} \quad (4.34)$$

Donde:

V_{\max} = Tensión máxima del sistema entre fases (se refiere al equipo) en kV

V_n = Tensión nominal del apartarrayos en kV

K_e = Factor de conexión a tierra.

El factor K_e depende de la forma en que está conectado al sistema a tierra, considerando la falla de línea a tierra que produce la sobretensión en las fases no falladas.

En la selección de apartarrayos, la selección de la tensión nominal está relacionada con las máximas tensiones temporales y su duración. Las sobretensiones de falla a tierra dependen de la conexión a tierra de la red y sus duraciones dependen de las protecciones y la construcción del mismo apartarrayos.

Absorción de energía.

Cada pastilla en la forma cilíndrica tiene un volumen definido por una altura y un diámetro que dependen del diseño de fabricación y de la correspondiente capacidad de absorción de energía. Si se cambia el volumen determinado para esas dimensiones, entonces se cambia también la capacidad de absorción de energía, lo que también ocurre cuando aumenta el volumen total de apartarrayos al elevar el número de pastillas en serie o en paralelo.

En resumen, la capacidad de absorción de energía es la propiedad que tiene un apartarrayos para disipar la energía provocada por transitorios de origen interno y externo, sin que el apartarrayos sufra daño o deterioro.

La clase de descarga de línea se relaciona con la capacidad de absorción de energía que el apartarrayos soporta debido a los transitorios que se presentan en las líneas y se define por un número que corresponde a la clase del apartarrayos.

Especificación de un apartarrayos.

Las características técnicas que se deben considerar para la especificación de un apartarrayos de óxido metálico son las siguientes:

- a) Tensión nominal (kV valor eficaz)
- b) Tensión de operación continua (kV valor eficaz)
- c) Corriente nominal de descarga (kA cresta)
- d) Capacidad de absorción de energía o clase de descarga de línea
- e) Forma de conexión a la línea.
 - Directa y permanentemente

- Con cuerno o entrehierro externo

f) Envolvente

El material de la cubierta aislante y faldones deben ser de hule de silicón, el aislamiento debe tener una superficie lisa, homogénea y libre de defectos superficiales.

g) Herrajes y partes metálicas

Todos los herrajes para sujeción, de conexión y las partes metálicas deben ser de materiales resistentes a la corrosión debida a ambientes húmedos, industriales o la combinación de estos .

h) Niveles de contaminación

i) Condiciones de operación.

- Temperatura y frecuencia.

En México deben satisfacer las siguientes condiciones de servicio:

- Temperatura ambiente: $-10^{\circ}C$ a $+40^{\circ}C$
- Frecuencia: 58Hz a 62Hz

Accesorios: en caso de ser requeridos, se pueden considerar dentro de la especificación los siguientes:

- Contador de descargas (con sensibilidad mínima de 500A)
- Anillos equipotenciales.

Todos los apartarrayos con conexión permanente usados en líneas de transmisión de 230kV y mayores, deben incluir anillos equipotenciales. Para tensiones menores, solo cuando se requiera. El tamaño y geometría de los anillos equipotenciales deben homogenizar el campo eléctrico y atenuar el efecto corona.

CAPITULO V MEJORAMIENTO DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

Para tener un buen sistema de tierras, se recomienda usar una malla de puesta a tierra colocada en la base de cada torre, esto implica un costo muy elevado por lo que no es económicamente factible, para evitar el gasto tan elevado se recomienda colocar.

- Cables de contrapeso
- Varillas de contrapeso
- Combinación de cables y varillas de contrapeso
- Aplicación de sales y carbón
- Adición de bentonita

Cables de contrapeso

Se entierran horizontalmente conductores de cobre unidos a la estructura de las torres, la resistencia disminuye con la longitud y con el aumento del diámetro del contrapeso enterrado en la siguiente figura se muestra el efecto descrito.

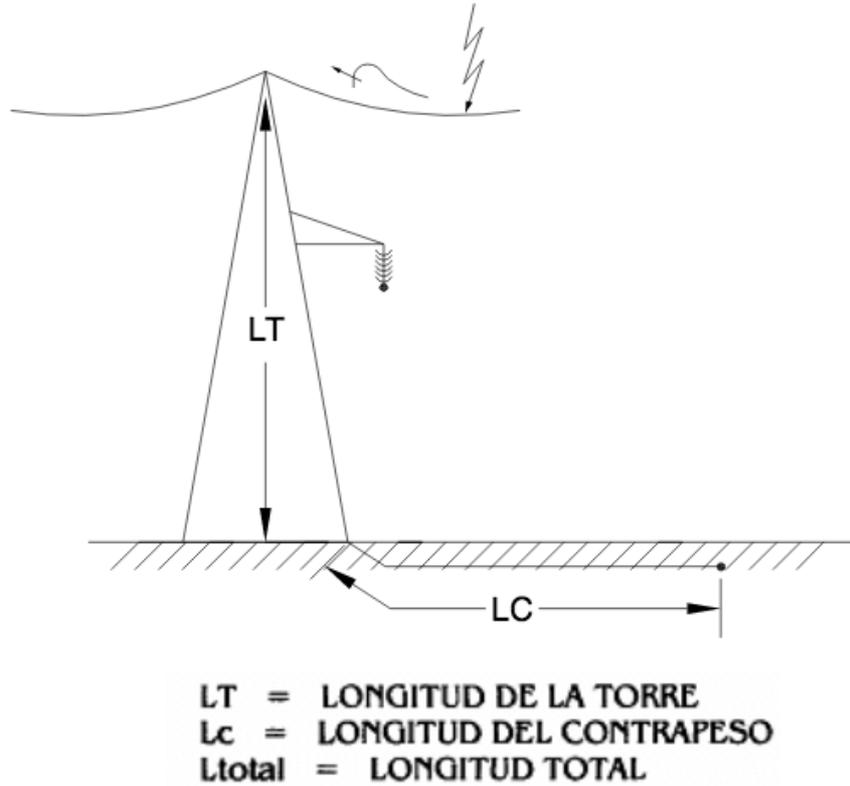


Figura 5.1 Distancia que recorre el impulso.

Algunos tipos de arreglos de cables de contrapeso que se utilizan para el mejoramiento de la puesta a tierra de las estructuras de las líneas de transmisión son los que se muestran en la siguiente figura.

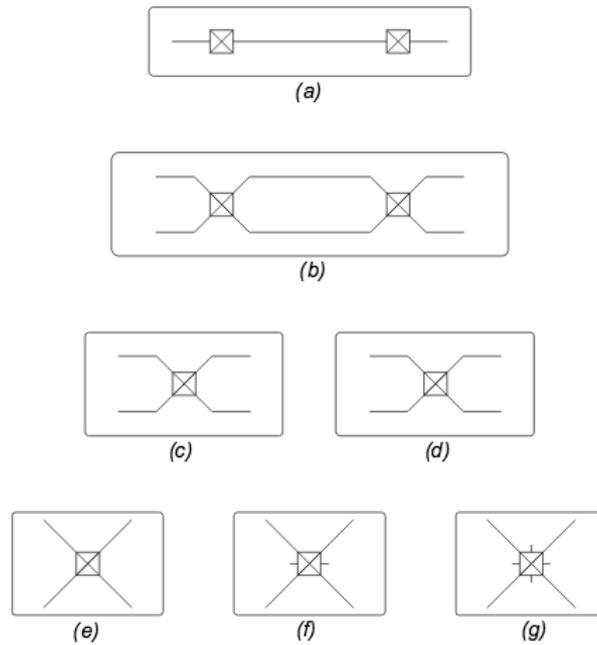


Figura 5.2 Arreglo de dispersores

Los arreglos (a) y (b) son los más costosos y solo tienen ventaja con los fenómenos de baja frecuencia (60Hz) por ser de baja longitud. El arreglo más utilizado es el (e).

Los contrapesos deben estar enterrados a una distancia considerable (1m) para evitar daños en el sistema de tierras.

Varillas de contrapeso.

La utilización de varillas de contrapeso, se hace principalmente para aterrizar pararrayos (copperweld) y consiste en enterrar verticalmente varillas conductoras pegadas a las estructuras de las torres al igual que los cables de contrapeso. La utilización de este material se basa en el principio de que la resistencia del suelo mejora con la profundidad. En algunos casos, es muy difícil enterrar la varilla por el tipo de terreno siendo costosa y complicada su colocación.

Combinación de cables y varilla de contrapeso.

La combinación en el uso de estos dos materiales, traerá consigo un mejoramiento en el valor de resistencia de puesta a tierra, dependiendo del tipo de terreno en el que se encuentra la torre y del tipo de arreglo que se coloque para los contrapesos. En la mayoría de los casos se utiliza la combinación de materiales del arreglo tipo (g).

Aplicación de sales y carbón.

La aplicación de sales fue utilizada hasta hace poco tiempo, tenía la característica de rebajar la resistencia del terreno en cortos plazos de tiempo. Cayó en desuso por la filtración de agua, la cual lavaba la sal y por consiguiente aumentaba de nuevo la resistencia del terreno. El carbón de origen vegetal es complementario de las sales, puesto que el primero, absorbe el agua salada y la retiene evitando el aumento del valor de la resistencia del terreno. Con el tiempo y las filtraciones de agua, el carbón absorbe más agua, por lo que se tiene menor cantidad de sales. Además el carbón se desintegra por la humedad contenida y permite que se lave mayor cantidad de sal.

Adición de bentonita.

La utilización de bentonita como un agregado al terreno en que se construye la puesta a tierra, se utiliza sólo en casos extremos cuando el tipo de suelo es altamente rocoso, arenisco o volcánico y no es posible utilizar métodos convencionales, o por medio de estos obtener valores satisfactorios de valores de puesta a tierra. Es uno de los minerales de arcilla más puros y su utilización es muy apropiada como masa de relleno y unión, además protege la puesta a tierra contra la corrosión.

Cálculo de la resistencia al pie de la torre.

El valor de la resistencia al pie de la torre, representa uno de los parámetros principales para la evaluación de las sobretensiones de retorno (descargas retroactivas) en las líneas de transmisión, por lo que el conocimiento del valor de esta resistencia es importante.

El valor de R_p está asociado y depende directamente del valor de la resistividad del terreno, pero depende también de la forma en cómo se conecta a tierra la torre, es decir, el elemento físico de conexión de la(s) pata(s) de la torre al suelo y que puede ser:

- Electrodo(s) (varillas)
- Contraantenas (conductores de cobre desnudos).

Conexión por medio de varillas.

La resistencia a tierra cuando se hace la conexión por medio de varillas se puede hacer por medio de la fórmula:

$$R_p = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{2l}{a}\right) \quad (5.1)$$

Donde:

l = longitud de la varilla en metros.

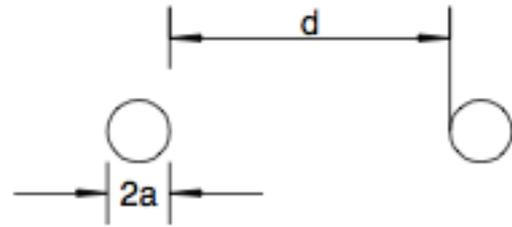
a = radio de la varillas en metros.

ρ = resistividad del terreno en Ωm

Cuando se conectan varias varillas en paralelo, se puede encontrar el radio equivalente como se indica en los siguientes casos:

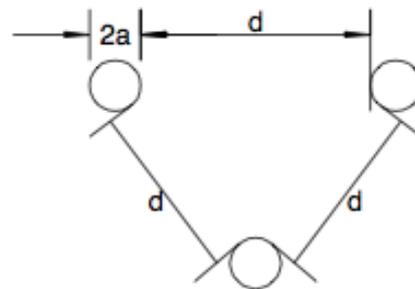
Dos varillas

$$A = \sqrt[3]{a * d^2} \quad (5.2)$$



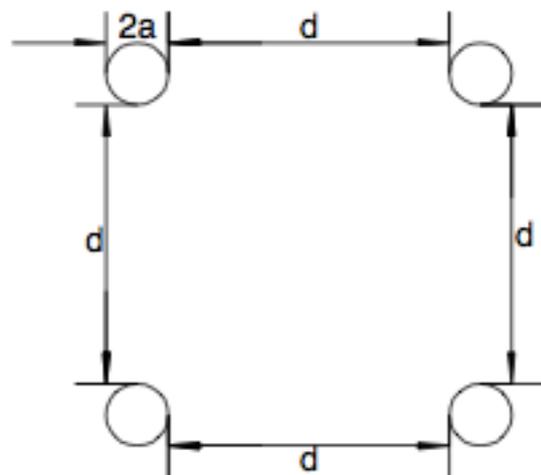
Tres varillas

$$A = \sqrt[3]{a * d^2} \quad (5.3)$$



Cuatro varillas.

$$A = \sqrt[4]{\sqrt{2} * a d^2} \quad (5.4)$$



Conexión por medio de contraantenas.

Para torres instaladas en terrenos con alta resistividad, el uso de varillas puede ser insuficiente para obtener valores de resistencia al pie de la torre bajos, en estos casos es recomendable el uso de una red de tierras a base de contraantenas o conductores enterrados a una profundidad de 60 a 70cm con respecto al nivel del suelo. La resistencia de una contra antena se calcula como:

$$R_p = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{2l}{4ad} - 1\right) \quad (5.5)$$

Donde:

l = longitud de la contraantena (m)

a= radio del conductor (m)

d= profundidad de instalación (m)

Cuando se usan 2 o 4 contraantenas en paralelo, es conveniente recordar aquí que es mejor instalar varios conductores en paralelo, en lugar de grandes longitudes de contraantena.

De hecho, las ondas de corriente se propagan en la tierra a una velocidad de aproximadamente 1/3 de la luz, de manera que la resistencia transitoria para una longitud de conductor dada, se reducirá a su valor de estado permanente más rápido en conductores cortos que en conductores largos.

El diseño de la conexión a tierra de las torres se debe seleccionar de acuerdo al valor de la resistividad del terreno, para obtener un valor aceptable de resistencia al pie de la torre. Valores típicos de resistividad para algunos tipos de terrenos son los siguientes:

- Terreno de cultivo 10 – 100 Ω m

- Terreno seco $100 - 1000 \Omega\text{m}$
- Suelo Rocoso $10^3 - 10^6 \Omega\text{m}$
- Grava y roca $10^7 - 10^8 \Omega\text{m}$

Importancia de una red de tierra.

La importancia de contar con una red de tierra en los sistemas eléctricos de potencia es la de cumplir con algunas de las siguientes características:

- Proveer un medio de baja impedancia que permita disipar las corrientes eléctricas a tierra, evitando exceder los límites de diseño de los equipos.
- Proporcionar una trayectoria a tierra para el neutro de los sistemas o equipos eléctricos que así lo requieran, limitando la aparición de potencial en el neutro de un sistema en estrella aterrizado.
- Contar con un medio seguro que aterrice los equipos eléctricos cuando estén en mantenimiento.
- Facilitar la operación de los relevadores que eliminan las fallas a tierra del sistema.
- Disipar la corriente asociada a las descargas atmosféricas, limitando las sobretensiones generadas.
- Limitar la elevación de potencial de la red a valores aceptables, cuando ocurra una falla a tierra.
- Evitar que, durante la circulación de estas corrientes de tierra, puedan producirse diferencias de potencial entre distintos puntos de la subestación, que puedan ser peligrosas para el personal.
- Proporcionar mayor confiabilidad, continuidad y seguridad al sistemas eléctrico.

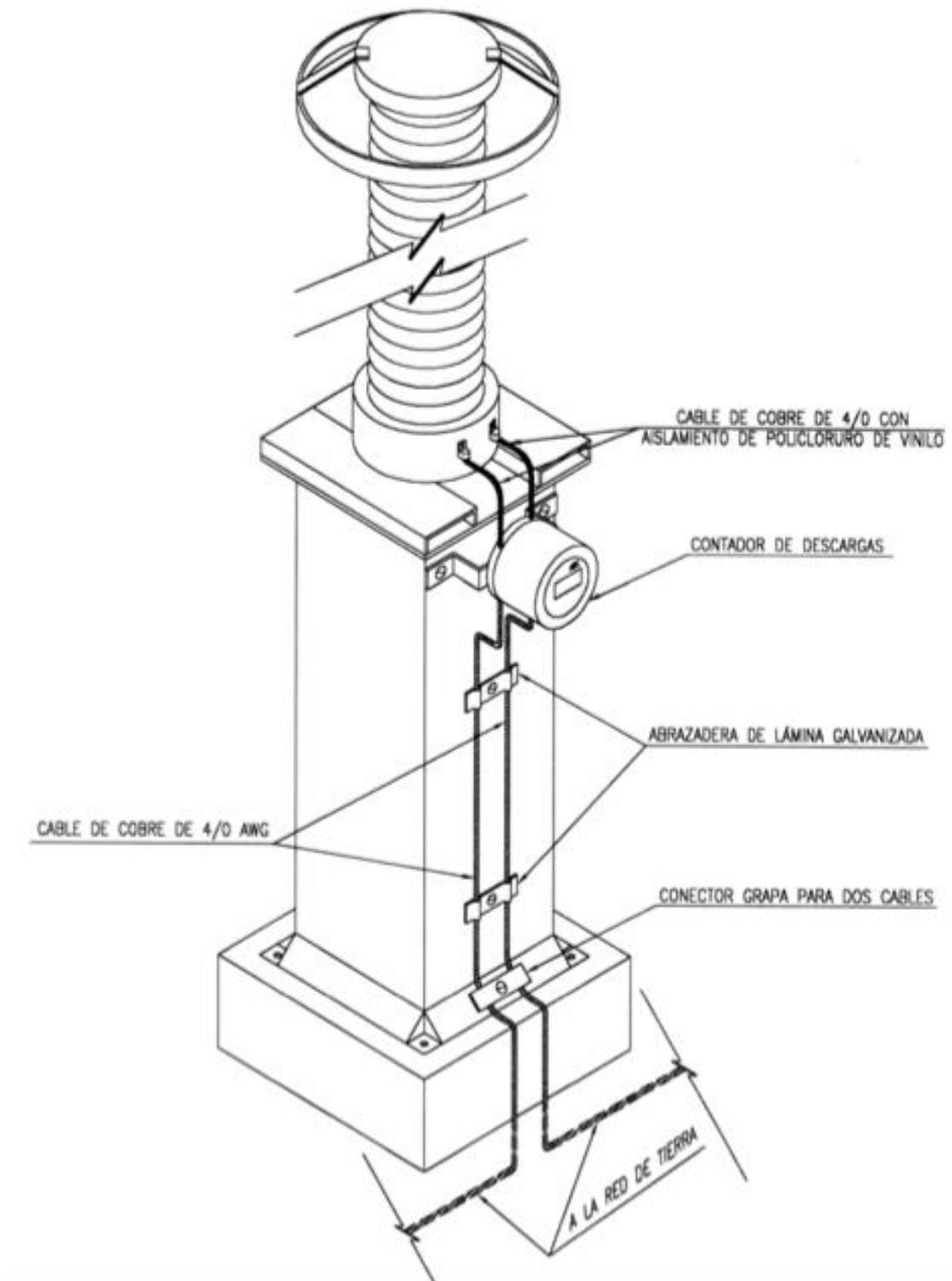


Figura 5.3 Elementos para conexión a tierra de un apartarrayos.

CONCLUSION.

Las líneas de transmisión requieren de la protección contra los impactos directos de las descargas atmosféricas y contra las ondas viajeras de sobretensión que llegan de otras partes del sistema.

La PROTECCIÓN contra estos impactos directos del rayo se logra por medio del blindaje, de manera que los rayos impactan a este, que está conectado a la red de tierras de la instalación. Las líneas de transmisión tienen su blindaje a base de cables de guarda y apartarrayos.

En esta investigación se dieron a conocer métodos analíticos basados en normas, con los que se brinda una protección adecuada en líneas de transmisión contra flameo inverso por el efecto de las descargas atmosféricas con base a las especificaciones de los dispositivos de protección y de la densidad de rayos a tierra en la República Mexicana.

La protección es más eficaz cuando se considera la factibilidad física y técnica de la instalación, previendo trayectorias y dando alternativas en derechos de vía, puesto que es de suma importancia determinar distancias mínimas de seguridad.

Los daños que se llegan a generar por la sobretensión que produce un rayo que impacta en la línea de transmisión pueden provocar fallas permanentes y de altos costos, por lo que es imprescindible contar con un el blindaje adecuado.

Se demuestra mediante cálculos que al haber un impacto directo en los cables de guarda se induce una sobretensión en los cables de fase, esto debido al campo magnético, y que tal sobretensión es mucho menor comparada con la sobretensión que se presentaría si el impacto fuese directo en los cables de fase.

Se determinó también la importancia de la localización geográfica sobre la cual se construye la línea de transmisión, esto es necesario para conocer el tipo de torre que debe instalarse, así como la cantidad de contraantenas que se requieran.

ANEXOS

1) Contra antenas y sus electrodos para la red de puesta a tierra de líneas de transmisión en construcción

INTERVALO DE RESISTIVIDAD RECOMENDADA DE DISEÑO ($\Omega \cdot m$)	LONGITUD DE CONTRA ANTENAS Y NUMERO DE SUS ELECTRODOS POR PATA	
	LONGITUD DE CONTRA ANTENAS POR PATA (m)	No. DE ELECTRODOS VERTICALES POR CONTRA ANTENA (VARILLA)
Menor que 100	3	1
100 a 300	6	2
300 a 500	12	3
500 a 750	24	5
750 a 1000	30	6
Mayor que 1000	30	6

2) Profundidad de las contra-antenas con relación al terreno donde se instalarán.

0.8 m	En terrenos no cultivables
1.5 m	En terrenos de cultivo
0.4 m	En terreno rocoso

3)

a.- Las normas o especificaciones indicadas corresponden a las vigentes.

b.- No se acepta el uso de conectores a compresión atornillables.

Concepto	descripción	Norma o especificación aplicable
Alambre o cable de Cu	Alambre de Cu electrolítico, en sección circular, temple semiduro, de sección transversal de 33.62 mm^2 o mayor. Conductividad I.A.C.S. a 208°C 97.66%	NOM-063-SCFI NMX-J-002 NMX-J-035 NMX-J-012 CFE E0000-32
Cable de acero recubierto de cobre	Cable de acero con recubrimiento de cobre soldado (30 ACS 7 No.9) con sección transversal de 46.44 mm^2 o mayor, diámetro	CFE E0000-33

	nominal de 8.71mm, resistencia de 1.27481 Ω/km	
Electrodos de tierra	Varilla de acero con recubrimiento de cobre electrolítico de acuerdo a la especificación	CFE 56100-16
Conexiones soldables	Conexiones soldables tipo exotérmico prototipo probado de acuerdo a los establecidos en la norma	IEEE-STD-837

4) Análisis del efecto de las descargas atmosféricas en las líneas de transmisión.

El efecto de las descargas atmosféricas en las líneas de transmisión se puede analizar a partir de los siguientes conceptos:

- Una línea construida en una zona geográfica en donde se tiene una densidad de rayos a tierra no está sometida a todos esos rayos, sino solo a aquellos que impacten el terreno cubierto por la línea.
- El método de evaluación del número de descargas que caen sobre una línea se basa en mediciones de la zona y es semiempírico de manera que se puede determinar en la siguiente ecuación :

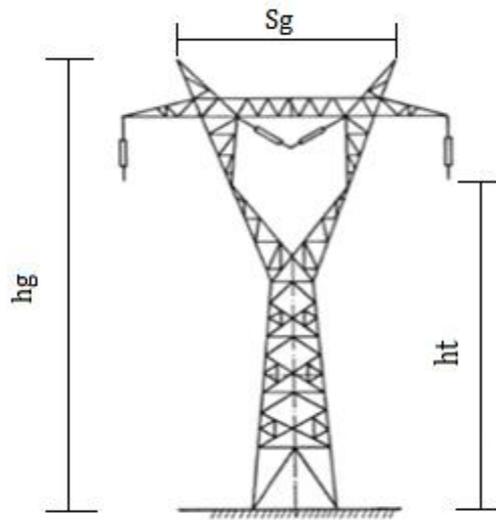
$$NOL = (0.04)^{1.25} [0.0133(ht + 2hg) + 0.1Sg] \frac{N. \text{ de rayos a la línea}}{100\text{km} - \text{año}}$$

Donde:

h_t = Altura equivalente de los conductores de fase de la línea.

h_g = Altura del cable de guarda en la torre.

S_g = Separación entre cables de guarda.



Para calcular la altura equivalente (h_t) de los conductores de la línea se debe considerar la altura del terreno donde se construye y que se dividen para fines prácticos en 3 criterios

- 1) Terreno plano $h_t = h_c - \frac{2}{3}(h_c - h_m)$ h_c : Altura del conductor de fase en la torre
- 2) Terreno ondulado $h_t = h_c$
- 3) Terreno montañoso $h_t = 2h_c$

Para analizar el efecto de las descargas atmosféricas sobre las líneas de transmisión se deben considerar 3 aspectos:

- El blindaje de la línea de transmisión
- Distancia en aire y longitud de las cadenas de aisladores
- Resistencia al pie de la torre

BLINDAJE: En la parte superior de la torre se instalan unos cables de acero cuya función es evitar en lo posible descargas atmosféricas (rayos) impacten a los conductores de fase, a esta función se le conoce como el blindaje y se expresa como la posición relativa entre los cables de guarda y los conductores de fase para las fases externas.

Esta posición relativa se indica por medio de un ángulo entre estos conductores y se conoce como ángulo de blindaje (θ)

La función del cable de guarda es que los rayos caigan dentro de su zona de influencia directamente sobre ellos de manera que se evite el impacto sobre los conductores de fase. Se dice que el blindaje es más efectivo en la medida que el ángulo θ se aproxime más a 0° e incluso negativo.

La elección de los ángulos de blindaje en la estructura de una línea de transmisión corresponde a la densidad de rayos a tierra en el sitio donde se instale la línea de transmisión de manera que:

Ángulos θ positivos en zonas de baja densidad de rayos, por ejemplo 2.8 a 3.1 rayos/km².

Ángulos θ de cero o negativos en las zonas de alta densidad de rayos, por ejemplo, 3.8 a 5.2 rayos/km²

DISTANCIA EN EL AIRE Y LONGITUD DE LAS CADENAS DE AISLADORES:

Para analizar este tema se tiene que considerar los posibles voltajes inducidos en los conductores de fase y el nivel básico de aislamiento usado para diseñar dieléctricamente la línea de transmisión.

Se consideran básicamente dos casos:

- Descargas sobre los conductores de fase
- Descargas en los cables de guarda de inducción en los conductores de fase

Descargas sobre los conductores de fase, se pueden presentar descargas en los conductores de fase cuando.

- No se tienen los cables de guarda, como es el caso de las redes de distribución.
- El blindaje de los cables de guarda no funciona de manera adecuada y las descargas se inducen en los conductores de fase.

Se dice que el voltaje inducido en los conductores de fase por la incidencia de la corriente del rayo de magnitud (I) partiendo de la suposición que en la corriente se diera en dos fases iguales ($I/2$) en el punto de impacto, se calcula como:

$$V = \frac{(Z_c)(I)}{2} \quad [KV]$$

Donde:

I= Corriente del rayo en KA

Z_c = Impedancia característica del conductor de fase, se expresa en Ω y se calcula según sea la naturaleza del terreno donde se construya la línea.

Para obtener la impedancia característica se utiliza la siguiente expresión.

$$Z_c = 60 \left(\ln \frac{2(h_t)}{r} \right) \quad [\Omega]$$

Donde:

h_t = Altura equivalente del conductor

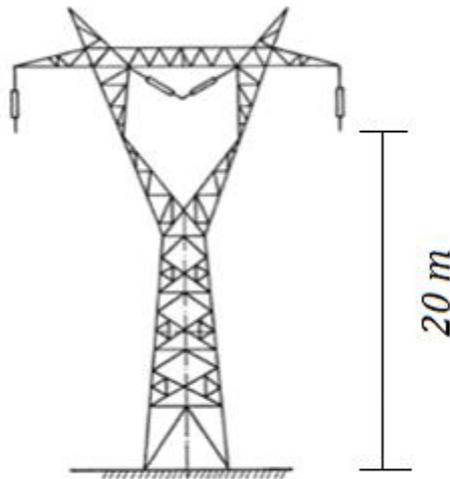
d = diámetro

en terreno plano $h_t = h_c - \frac{2}{3}(h_t - h_m) \implies h_t = h_c - \frac{2}{3}f$

donde f = flecha

Ejemplo:

Calcular la impedancia de una línea de transmisión cuyas dimensiones y datos se indican en la siguiente figura



La línea se construye en terreno plano y tiene un claro de 300m usa un conductor por fase de 900kcm que tiene un diámetro de $d=2.5\text{cm}$ y la flecha $f=2.5\text{m}$

Datos:

$h_c=20\text{m}$

$f=2.5\text{m}$

$d=2.5\text{cm}$

La impedancia característica es:

$$Z_c = 60 \left(\ln \frac{2(h_t)}{r} \right)$$

h_t se obtiene de la siguiente ecuación debido a que la línea se construye en un terreno plano:

$$h_t = h_c - \frac{2}{3}f \quad \Longrightarrow \quad h_t = 20 - \left(\frac{2}{3}\right)(2.5) = 18.33m$$

Sustituyendo el valor de h_t :

$$Z_c = 60 \left(\ln \frac{2(1833)}{\frac{2.05}{2}} \right) = 490.92\Omega$$

Si se supone que la línea se impacta con una corriente del rayo de 10KA, el voltaje inducido es:

$$V = \frac{Z_c(I)}{2} = \frac{(490.92)(10)}{2} = 2454.6KV$$

Si ahora se considera que la línea se construye en terreno ondulado, entonces:

$$h_t = h_c = 20$$

La impedancia característica sería:

$$Z_c = 60 \left(\ln \frac{2(2000)}{\frac{2.05}{2}} \right) = 496.61\Omega$$

El voltaje inducido para la corriente de $I=10KA$:

$$V = \frac{Z_c(I)}{2} = \frac{(496.61)(10)}{2} = 2483KV$$

Si ahora se considera que la línea se construye en terreno montañoso, entonces:

$$h_t = 2(h_c) = (2)(20) = 40m$$

La impedancia característica en este caso sería:

$$Z_c = 60 \left(\ln \frac{2(4000)}{\frac{2.05}{2}} \right) = 537.75\Omega$$

El voltaje inducido para la corriente de $I=10KA$:

$$V = \frac{Z_c(I)}{2} = \frac{(537.75)(10)}{2} = 2688.75KV$$

De los casos anteriores en los que se consideran los tres tipos de terreno se obtiene la siguiente tabla.

TIPO DE TERRENO	VOLTAJE INDUCIDO (KV)
TERRENO PLANO	2454.6
TERRENO ONDULADO	2483
TERRENO MONTAÑOSO	2688.75

Glosario de términos

Apartarrayos.

Dispositivo que se encuentra conectado permanentemente en el sistema. Opera cuando se presenta una sola tensión de determinada magnitud, descargando la corriente a tierra.

Blindaje en líneas de transmisión.

Se refiere a barreras físicas de protección utilizadas en el sistema eléctrico para reducir o evitar daño causado por descargas atmosféricas, por maniobra de interruptores o transitorios originados en la línea.

Cable o hilo de guarda.

Cable desnudo, generalmente de acero que se fija sobre una estructura metálica. Se coloca por encima de los conductores de fase y se conectan a tierra en los apoyos a lo largo de la línea.

Capacitancia.

Parámetro que modela el campo eléctrico que se establece entre los conductores de la línea y entre los conductores y tierra, debido a la carga en los conductores.

Conductancia.

La conductancia es una propiedad de un material que facilita la conducción de la corriente eléctrica. Numéricamente es inversa a la resistencia. Es también el resultado de la fuga sobre la superficie de los aisladores.

Descargas atmosféricas.

Es la igualación violenta de cargas de un campo eléctrico que se ha creado entre una nube y la tierra, o entre nubes.

Efecto corona.

Es una descarga causada por la ionización del aire que rodea al conductor cuando este se encuentra energizado.

Falla a tierra.

Se deben a una conexión eléctrica accidental entre el conductor de un equipo o aparato y su carcasa o estructura metálica, o bien entre conductor y un medio metálico.

Flameo.

Es una descarga disruptiva a través de la superficie de un aislamiento sólido o líquido. Ocurre por la fuga de electrones, principalmente de los aisladores que se encuentran sucios o húmedos.

Flecha.

Distancia medida verticalmente desde el conductor hasta una línea recta imaginaria que une sus dos puntos de soporte. A menos que se indique lo contrario, la flecha siempre se medirá en el punto medio del claro.

Especificaciones.

Conjunto de reglas escritas, de fácil comprensión, con descriptiva clara y precisa de los requisitos técnicos de los materiales, equipos o servicios que un comprador elabora en una o varias normas. Fijan los requisitos mínimos de aceptación en cuanto a características eléctricas, mecánicas químicas, etc.

Inductancia.

Es el parámetro de línea más dominante en los sistemas eléctricos de potencia. Se da por la misma corriente que circula por el conductor puesto que produce campos magnéticos alrededor del mismo; esto por las contribuciones del flujo interno y externo del mismo conductor.

Línea de transmisión.

Circuitos de potencia y distribución en los que intervienen diferentes tipos de torres, conductores, aisladores. Pueden ser líneas de transmisión aéreas y subterráneas.

Línea aérea.

Línea abierta soportada en postes u otro tipo de estructuras con los accesorios necesarios para la fijación, separación y aislamiento.

Normas.

Son publicaciones formuladas y aplicadas para la aportación técnica y económica. Son editadas por organismos especializados en las distintas áreas de investigación.

Pararrayos.

Instrumento cuyo objetivo es atraer un rayo y conduce la descarga a tierra, de tal modo que no cause daños a construcciones, personas u elementos eléctricos.

Resistencia.

Es la oposición de un material al flujo eléctrico, es decir, interfiere en el movimiento libre de electrones.

Sobretensiones. Son voltajes de fase a fase o bien de fase a tierra en las que un valor excede el valor pico más alto del voltaje al que está diseñado el equipo.

Bibliografía

- [1] D.P. Kothari-I.J.Nagrath.
Sistemas eléctricos de potencia.
- [2] W.W. Lewis
The protection of transmission systems against lightning
Dover publication, inc., New York, 1965.
- [3] Especificación CFE L0000-06, "Coordinacion de aislamientos"
- [4] E. Kuffel, "High Voltage Engineering", Segunda edición
Edit:Maecel Dekker Inc. EUA 1990""
- [5] <https://www.go.mx/sener/documentos/perspectiva-del-sector-energetico>
- [6] J. Duncan Glover, Mulucutla S. Sarma "Sistemas de potencia" Tercera edición.
Edit: Thomson
- [7] Luis Maria Checa "Líneas de transporte de energía"
Edit: Alfaomega
- [8] Manuel Llorente Anton "Cables eléctricos aislados"
Edit: Paraninfo
- [9] <https://www.gob.mx/sener/documentos/estrategia-nacional-de-energia>
- [10] IEEE "fenómeno de descarga atmosférica" IEEE, Julio 2007
- [11] Jose Roberto Duarte "Blindaje en líneas de transmisión", México D.F. 2010
- [12] CFE "Memoria de calculo del parámetro conductor, guarda y CGFO tramos" México, D.F. 2010
- [13] Especificación <<CFE 00J00-52 Red de puesta a tierra para estructuras de líneas de transmisión aéreas de 69KV a 400KV en construcción>> México, mayo 2011