

Boletín 84

PUESTA A TIERRA

**LINEAS DE
TRANSMISION Y
DISTRIBUCION**

Boletín técnico N°84

PARTE 1

Ing. Gregor Rojas

Caracas - Venezuela

LINEAS DE TRANSMISION Y DISTRIBUCION PUESTA A TIERRA

PARTE 1

Por:

Ing. Gregor Rojas
GERENTE NACIONAL
MERCADERO Y VENTAS
División materiales eléctricos

1. Generalidades.

Las líneas de transmisión y distribución 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 aéreas están constituidas por conductores en el aire apoyados en estructuras metálicas denominadas 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.

Un sistema eléctrico de potencia está formado por tres partes importantes con funciones bien definidas: generación, transmisión y distribución todas con el objeto de entregar energía eléctrica a consumidores. Dentro de este sistema la parte más vulnerable es la línea de transmisión, debido principalmente al efecto de las descargas atmosféricas que producen el mayor porcentaje de interrupciones de servicio, esto implica que las líneas pierdan continuidad en el suministro, reflejándose en los índices de confiabilidad del sistema.

Un sistema de tierras para líneas de transmisión es un conjunto de conductores, apartarrayos, electrodos, accesorios, etc, que interconectados eficazmente tienen por objeto conectar a tierra las cubiertas y otras partes metálicas de los equipos eléctricos, así como aquellos elementos de los circuitos que lo requieran y que resultan altamente

expuestos a descargas y sobretensiones peligrosas.

2. Objetivos de los sistemas de puesta a tierra.

Esencialmente los sistemas de puesta a tierra son diseñados para atender los siguientes objetivos:

- ❑ Evitar diferencias de potencial peligrosos para las personas que laboran o transitan en las instalaciones, particularmente en condiciones de falla, potenciales que pueden aparecer en el piso o entre partes metálicas. También las partes bajo voltaje de una instalación pueden quedar sometidas a potenciales peligrosos que ocasionan fallas de aislamiento, con el consiguiente riesgo para las personas.
- ❑ Contribuir a establecer valores de voltaje bajos entre las líneas y tierra, durante fallas residuales en los sistemas eléctricos. Tenga presente que los voltajes entre las líneas no comprometidas y tierra cuando se produce un cortocircuito monofásico o bifásico a tierra, dependen de la efectividad de la puesta a tierra del sistema. Esta efectividad es función de los valores relativos de la impedancias de secuencia y el valor de resistencia de la puesta a tierra. La magnitud de estos voltajes inciden en el dimensionamiento del aislamiento.
- ❑ Proporcionar una vía de baja impedancia para la operación correcta de las protecciones tales como fusibles y relés de sobrecorriente, etc. Para relés de distancia de admitancia puede ocurrir que la combinación de la impedancia del tramo de línea fallada y la resistencia de puesta a tierra alta de una torre o estructura dé lugar a la no operación de la tercera zona del relé. Por esta razón se recomienda usar protecciones de distancia tipo reactancia.
- ❑ Conducir a tierra en forma eficiente las corrientes provenientes de las descargas atmosféricas, limitando las diferencias de potencial que pudiera producirse en la

instalación. Una descarga atmosférica que incide sobre una torre o estructura puede dar lugar a un arco inverso hacia uno o más conductores de línea, creando ionización del aire, manteniéndose después el arco por el voltaje de la línea. Por tal motivo, las antenas de comunicaciones, los techos y estructuras metálicas ubicadas en zonas de alto nivel cerámico deben ser conectados efectivamente a tierra.

Al momento de realizar el diseño de tendidos de líneas de transmisión partiendo del hecho factible de las descargas atmosféricas se deberá tener presente los siguientes elementos:

- El espaciamiento eléctrico
- La cantidad de aisladores
- El ángulo de apantallamiento
- El sistema de puesta a tierra de las torres

Los cuales son ajustados de modo que ofrezcan una tasa de salidas preestablecida según los criterios básicos del proyecto de la línea de transmisión.

Los tres primeros corresponden a la coordinación del aislamiento de la línea de transmisión, entre las normas que aplican para esta coordinación están la IEC 60071 que trata de la coordinación de aislamiento, la IEC 60815 que trata sobre la selección y dimensionamiento de aisladores de alta tensión destinados a uso en condiciones de contaminación, a objeto de corregir los efectos producidos por la contaminación en las cadenas de aisladores, la ANSI C29.2 que trata sobre la distancia de fuga de los aisladores y sus características eléctricas.

Normalmente las cadenas de aisladores se dimensionan para sobrevoltajes de maniobra y el ángulo de apantallamiento tiene el propósito de reducir que quede expuesto el conductor de línea a una descarga atmosférica.

2.1 Espaciamiento eléctrico.

Con respecto a los espaciamientos eléctricos de las líneas de transmisión, las exigencias atmosféricas tienen menor importancia a medida que el nivel de voltaje se incrementa, debido a que en esa medida se requiere un aumento del nivel de aislamiento de las líneas de transmisión.

En las normativas de CORPOELEC dependiendo del nivel de voltaje que se opere, las distancias mínimas del conductor a cualquier punto de la estructura no será inferior a los siguientes valores:

- Nivel de voltaje de 115 KV separación mínima de 1,56 metros.
- Nivel de voltaje de 230 KV separación mínima de 2,63 metros.

Estas distancias se verificaran bajo una condición de presión de viento nula sobre el conductor.

De igual forma, la separación vertical mínima en cruces con líneas de transmisión y distribución de energía, obliga al proyectista a mantener las distancias indicadas en la siguiente tabla 1:

Tabla 1		
Separación vertical mínima		
Terreno cruzado	Separación vertical mínima m	
	Nivel de voltaje	
	115 KV	230 KV
Líneas comunicación	3	4
Cables de guarda y conductores aterrados	2,5	3,5
Conductores de otras líneas de transmisión:		
Menor o igual 69KV	2,5	3,5
115KV	2,75	3,75
138KV		4
230KV		4,5

2.2 Cantidad de aisladores.

La cantidad de aisladores de una línea de transmisión se diseña para soportar todo sobrevoltaje interno referido a sobrevoltajes por maniobra y sobrevoltajes de baja frecuencia, no obstante, no todo sobrevoltaje extremo asociado al impulso de voltaje ocasionado por descargas atmosféricas es tomado en consideración, debido a que la longitud de la cadena de aisladores sería tan grande que el costo del aislamiento resultaría exageradamente alto.

Con respecto a los sobrevoltajes de baja frecuencia se deben hacer correcciones por variables ambientales tales como:

- Densidad relativa del aire
- Humedad absoluta y relativa
- Precipitación o lluvia
- Contaminación
- Viento, factor determinante del ángulo de balanceo

Pero cuando el aislamiento está sometido a impulsos de origen atmosférico no se hacen correcciones por variables ambientales porque no alteran el comportamiento del aislamiento tales como las precipitaciones, humedad, etc.

A continuación veremos unas tablas con las cantidades de aisladores típicas en líneas de transmisión dependiendo del nivel de voltaje que manejan, es importante resaltar que nos referimos a aisladores de porcelana, por supuesto no aplica a aisladores poliméricos. De igual forma si son cadenas de aisladores para retención o amarre.

En las líneas de transmisión aéreas debido al alto nivel de voltaje al cual operan se hace necesario la utilización de cadenas de aisladores, constituidas por cierta cantidad de aisladores montados en serie, donde el nivel de aislamiento de la cadena es siempre menor que n veces la aislamiento de

un aislador solo, esto se hace notorio cuando el número de aisladores es grande.

El largo de la cadena depende del nivel de voltaje, mientras más elevado sea, en esa medida se incrementara el largo de la cadena, para cumplir con la distancia mínima, conllevando a que se necesite una mayor altura de las torres.

En Venezuela en el sistema de transmisión se han normalizado el número de aisladores, de acuerdo al nivel de voltaje de operación de la línea referenciado en la tabla 2 siguiente:

Tabla 2 cantidad de aisladores en cadena según nivel de voltaje	
Nivel de voltaje	Cantidad de aisladores
115 KV	9
230 KV	14
400 KV	23
765 KV	42

2.3 Angulo de apantallamiento.

El apantallamiento en las líneas de transmisión es realizada a través del cable de guarda, este cable es un conductor tendido en paralelo y sobre los conductores de fase de una línea de transmisión, ubicado en la parte superior de la torre o estructura, de tal forma de cubrir o apantallar los conductores de fase.

Cuando se posee una disposición de conductores de fase en doble circuito, se requiere dos cables de guarda para proporcionar una protección eficaz a los conductores de fase de cada lado de la torre de transmisión, esto debido a descargas atmosféricas directas.

En la figura 1 se puede observar la representación de un cono que encierra la zona protegida que abarca las líneas de ambos lados de una torre de doble circuito. Cabe resaltar que cuando se trata

de un solo circuito dispuesto en configuración vertical, únicamente se requiere de un solo cable de guarda.

El cable de guarda generalmente está compuesto por hilos de acero galvanizado o el mismo calibre del conductor ACSR usado en los conductores de líneas o fases.

La zona de protección es un cono con vértice en el cable de guarda y con una base que termina en el conductor de fase más alejado de la estructura o torre tal como se aprecia en la figura 2.

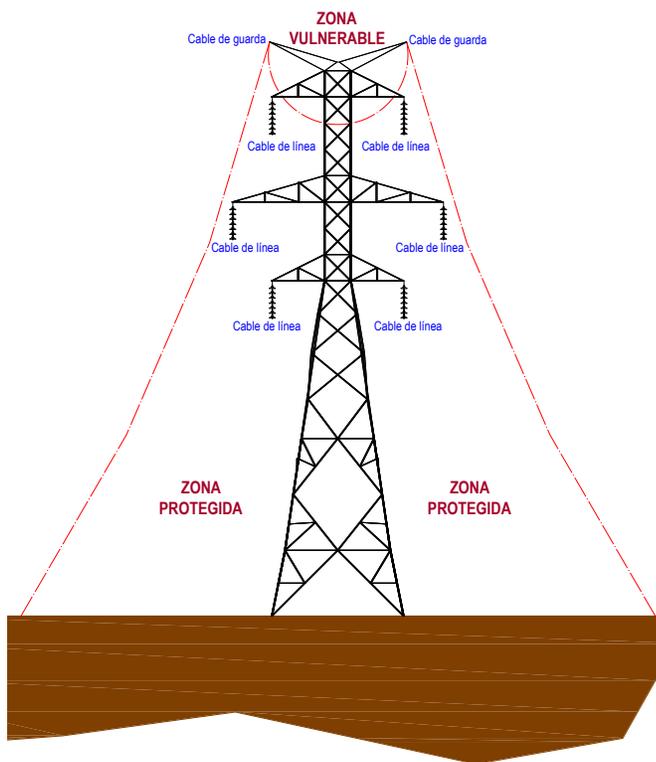


Figura 1. Zona de protección obtenida de dos cables de guarda

El ángulo de protección que suministra el cable de guarda se puede definir como el ángulo entre la línea vertical que pasa por el cable de guarda y la línea que une el cable de guarda y el conductor de fase más alejado de la estructura.

El material y el tamaño del conductor requerido en el diseño provienen más de una consideración mecánica que eléctrica. Una reducción de la resistencia efectiva a tierra se puede lograr por medios relativamente simples y más baratos.

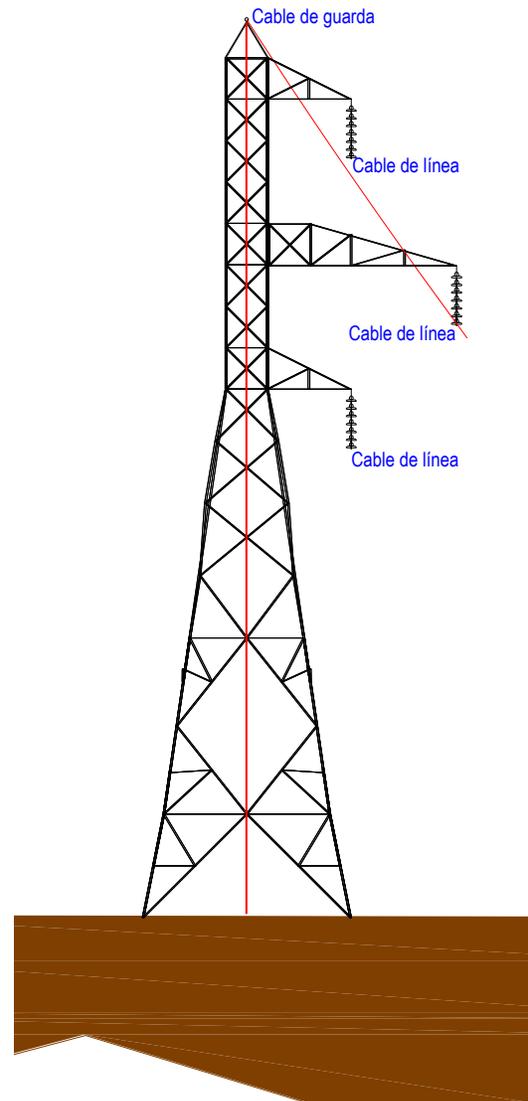


Figura 2. Descarga atmosférica sobre un tramo del cable de guarda

Los cables de guarda ofrecen una protección adecuada a todos los conductores de línea que se encuentran debajo de un cuadrante circular con centro a la altura del cable de guarda y con su radio igual a la altura del cable de guarda por encima del suelo.

Al emplear dos o más cables de guarda, la zona de protección entre los dos cables adyacentes puede ser tomada como un semi-círculo que tiene como diámetro una línea que conecta los dos cables de guarda.

La experiencia de campo junto a las investigaciones de laboratorio, han demostrado que el ángulo de protección debe ser de casi 30° en zonas llanas mientras que el ángulo disminuye en zonas montañosas en un valor igual a la pendiente de la colina.

Con respecto al ángulo de apantallamiento, se dice que el blindaje efectivo de los cuadros conductores se logra cuando la posición de los cables de guarda es tal, que el número de salidas debido a la incidencia de los rayos en los conductores de fase (descargas directas) sea igual a cero.

Cuando lo anterior no puede ser logrado se diseña con una metodología de cálculo para la determinación del índice de salidas por descargas directas (en los conductores de fase).

De acuerdo con las mediciones efectuadas en las líneas de transmisión se establece que la falla del blindaje está asociada con rayos de baja intensidad de corriente y las salidas por descargas en los cables de guarda o en las torres son debidas a rayos con corrientes de alta intensidad.

Tenga presente que el voltaje de una torre de transmisión se eleva cuando incide sobre ella una descarga atmosférica o rayo, es independiente del voltaje de operación del sistema lo que implica que el diseño de línea de transmisión contra descargas atmosféricas para un rendimiento requerido es independiente del voltaje de funcionamiento.

El requisito básico para el diseño de una línea basada en trazo directo son:

- ❑ Los cables de tierra utilizados para el blindaje de la línea deben ser mecánicamente fuertes y estar ubicados de forma que den protección suficiente.
- ❑ Espacio suficiente entre conductores de líneas y la estructura de la torre para un voltaje de servicio particular.
- ❑ La resistencia al pie de la torre o estructura debe ser tan baja como económicamente sea posible.

Para cumplir con el primer factor, el cable de tierra, como hemos visto con anterioridad está hecho de alambre de acero galvanizado o alambre ACSR y el ángulo de protección esta en función de la ubicación del cable de guarda para un blindaje efectivo.

El segundo factor o espacio libre adecuado entre el conductor y la estructura de la torre se obtiene mediante el diseño de una longitud adecuada del brazo transversal tal que cuando una cadena de aisladores se le da un giro de 30° hacia la estructura de la torre el espacio de aire entre el conductor de alimentación y la estructura de la torre sea suficientemente bueno para soportar la tensión de conmutación esperada en el sistema, normalmente cuatro veces el voltaje de línea a tierra.

El tercer requisito es contar con una baja resistencia en las bases o pies de la torre o estructura lo más económicamente factible. El valor típico de esta resistencia aceptable es de aproximadamente 20 ohmios.

El rendimiento de la línea con respecto a una descarga atmosférica depende del valor de impulso de la resistencia, que es una función de la resistividad del suelo, gradiente de ruptura crítico del suelo, longitud y tipo de contrapesos, si como, de la magnitud de la corriente de sobretensión.

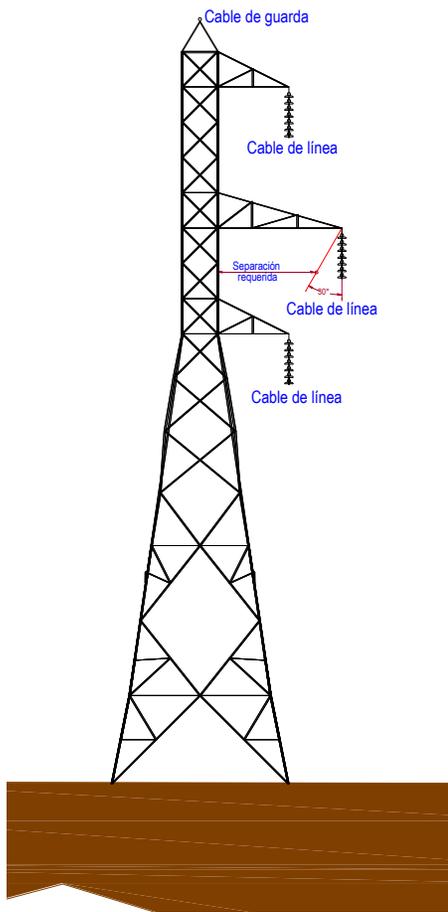


Figura 3. Descarga atmosférica sobre un tramo del cable de guarda

2.3.1. Descripción del fenómeno

Los sobrevoltajes son elevaciones de voltaje originados por descargas atmosféricas que inciden en la instalación de la línea de transmisión, estas sobrevoltajes son unidireccionales de muy corta duración, su valor depende del voltaje de la línea o sistema. Estas descargas pueden ser:

- ❑ Directas, es decir, alcanza directamente algún conductor de fase, son las más graves, debido a que la magnitud de estos sobrevoltajes son independientes del nivel de voltaje del sistema.
- ❑ Indirectas, son aquellas que impactan sobre el cable de guarda, las torres o estructuras.

- ❑ Inducidas, se producen cuando la descarga atmosférica cae en la cercanía de la línea o torre.

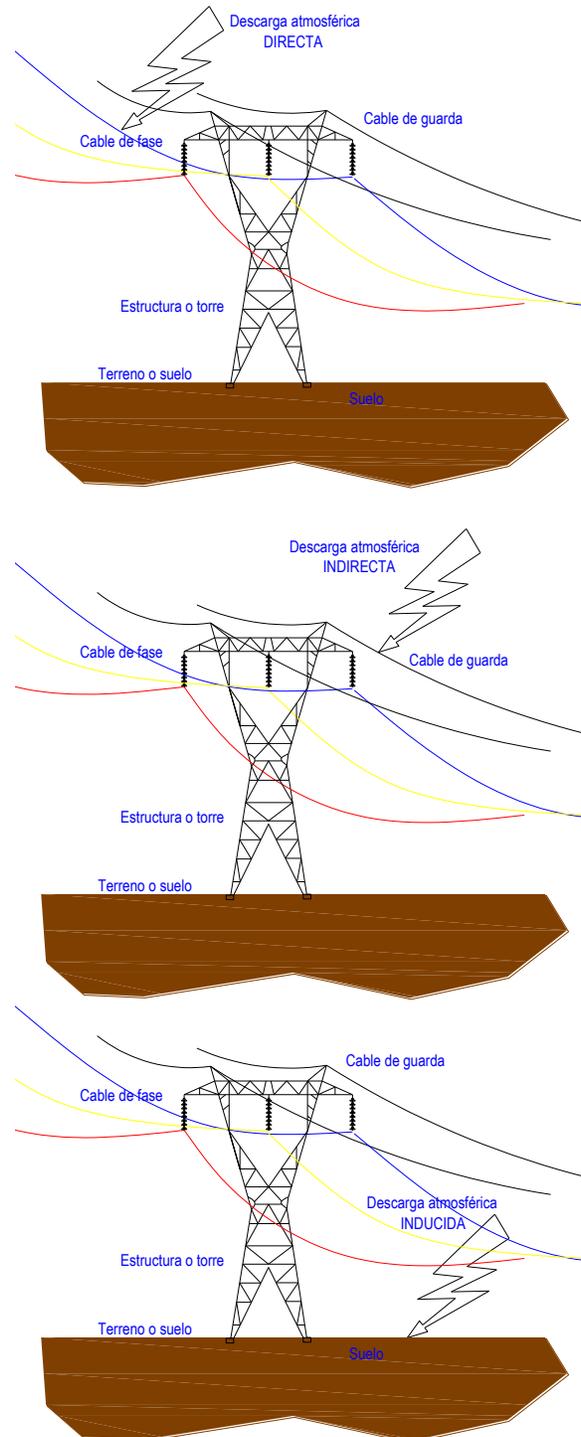


Figura 4. Esquemático de posibles descargas atmosféricas en líneas de transmisión

En la figura 4 se puede observar las tres tipos de descargas atmosféricas tratadas anteriormente: la directa, la indirecta y la inducida.

Cuando una descarga atmosférica cae en cualquier parte de la sección del cable de guarda, la corriente debida a la descarga fluye en ambos sentidos a través de la impedancia impulso del cable de guarda y se descarga a tierra entre las dos torres que sostienen el cable afectado, bajo estas circunstancias el frente de onda es dividido en dos.

En la figura 5 se puede observar la caída de una descarga atmosférica sobre uno de los dos cables de guarda, las ondas de corriente y voltaje se propagan en ambas direcciones hasta llegar a la torre, descienden por estas y se encuentran con una resistencia de puesta a tierra que se encarga de disipar toda la energía asociada con la descarga atmosférica.

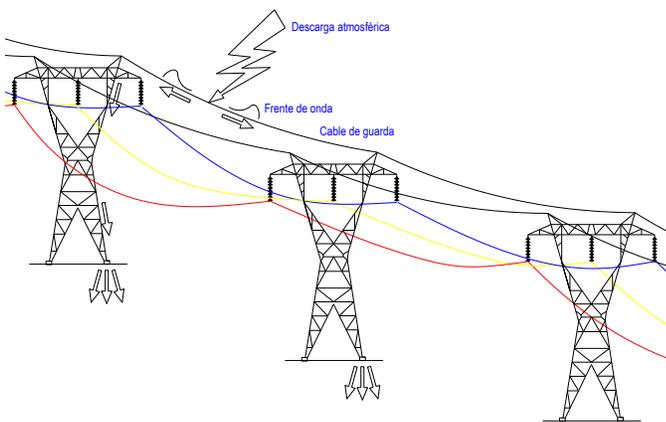


Figura 5. Descarga atmosférica sobre un tramo del cable de guarda

En forma análoga al primer caso de una descarga atmosférica sobre una sección del cable de guarda, en la figura 6 se puede observar la incidencia de una descarga atmosférica directamente sobre la torre, la onda de corriente y voltaje se propaga por la estructura de la torre

descendiendo por esta hasta encontrarse con una resistencia de puesta a tierra que se encarga de disipar toda la energía asociada con la descarga atmosférica.

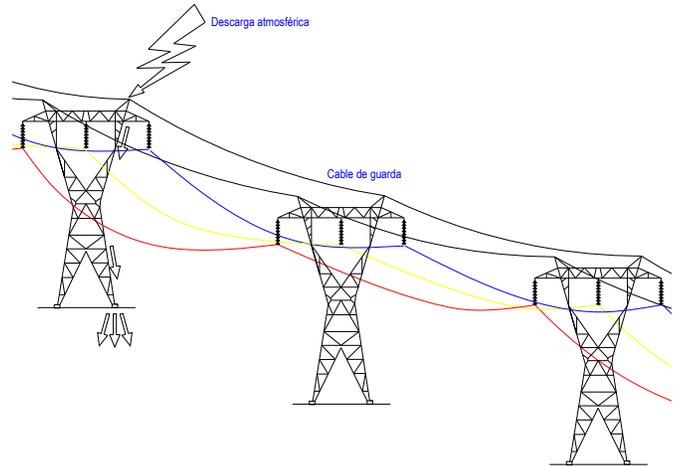


Figura 6. Descarga atmosférica sobre una torre de líneas de transmisión

De acuerdo a lo descrito anteriormente, una descarga atmosférica puede considerarse como una fuente de corriente capaz de hacer fluir una intensidad permanente a través de una impedancia. El voltaje generado de la descarga atmosférica es producido por la corriente y la impedancia a través de la cual circula.

Las descargas atmosféricas que inciden en las secciones de los cables de guarda y en las torres, tienen la predisposición de caer próximas a éstas, debido a que son los puntos más elevados de las líneas de transmisión, protegiéndose así a los conductores de líneas o fases.

Las estadísticas sobre esta materia han demostrado que dependiendo del tipo de torre para líneas de transmisión y de la masa de sus estructuras metálicas, se ha determinado que pueden llegar a caer hasta un 60% de las descargas atmosféricas en las proximidades de las torres.

Cuando un cable de guarda es impactado por una descarga atmosférica, se produce una inducción de una fracción de su potencial en los conductores de línea o fase debido al factor de acople capacitivo entre conductores y el cable de guarda.

La anterior inducción representa un serio problema cuando la resistencia de puesta a tierra de la torre es muy alta, produciendo que la corriente de la descarga atmosférica rebote generando que se desarrolle un alto voltaje que eleva el potencial de la torre de transmisión con relación a la resistencia de puesta a tierra.

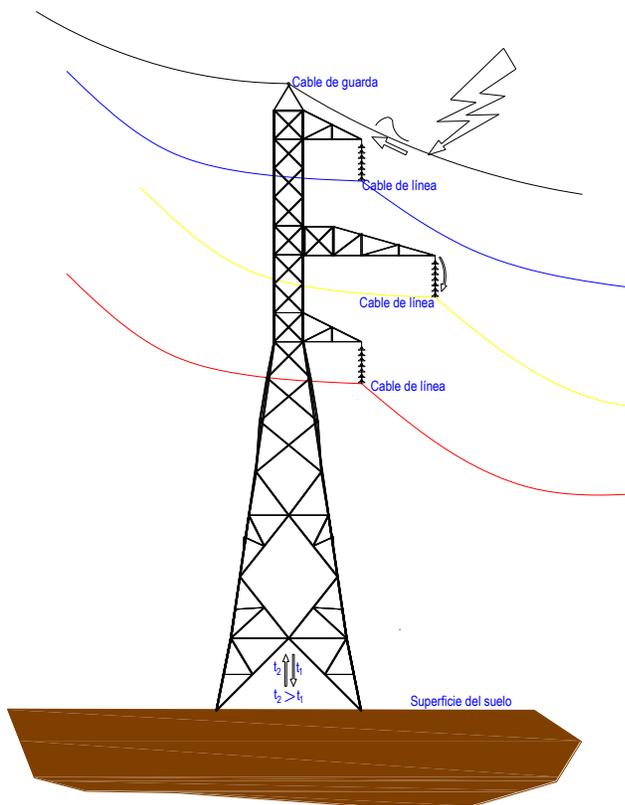


Figura 7. Producción de flameo inverso en torres de transmisión

La descarga atmosférica que incide directamente sobre el cable de guarda o en la torre, al llegar a la base de la torre sembrada en el suelo y conseguir una alta resistencia de puesta a tierra de la estructura no encuentra un medio propicio

para la disipación de la corriente de la descarga atmosférica de modo eficiente, con lo cual, hace que la torre alcance un alto potencial eléctrico, que aumenta súbitamente el voltaje entre el brazo de la torre y el conductor de línea, hasta el extremo de superar el aislamiento proporcionado por el aire en la cadena de aisladores, produciéndose de esta forma lo que se conoce como flameo inverso y va desde el brazo de la torre que se encuentra a un alto potencial y el conductor que este sostiene.

Como se dijo en la descripción anteriormente es lo que se conoce como flameo inverso y denominado de esta manera debido a que se genera desde el brazo de la torre hacia el conductor de línea como puede apreciarse en la figura 7.

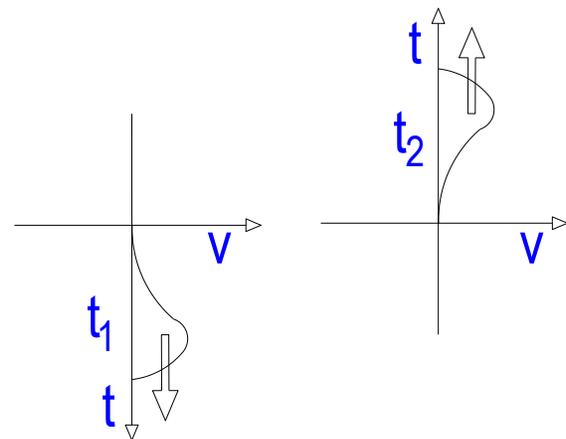


Figura 8. Esquema de frentes de onda producidos por descargas atmosféricas

En la figura 8 anterior, se puede observar un esquema de como sería el frente de onda que desciende por la estructura de la torre hacia la puesta a tierra de la misma en el tiempo t_1 , cuando esta descarga atmosférica no puede ser disipada a través de la puesta a tierra de esta torre, se produce un reflexión de este frente de onda que sube por la estructura de la torre y se dirige hacia los conductores de línea, al lado también se puede ver la figura del frente de onda que sube en el tiempo t_2 .

Tenga presente que adicionalmente de la corriente que circula a través de la estructura de la torre esta produce un campo magnético variable entre el conductor de línea y la torre, lo cual es una contribución al flameo inverso.

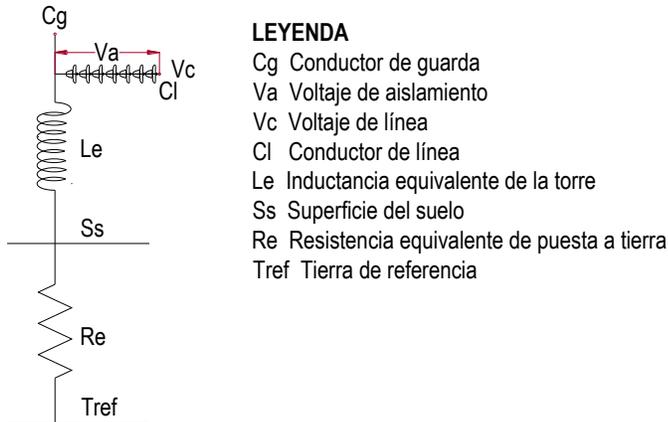


Figura 9. Esquema eléctrico equivalente de torres de líneas de transmisión

En la figura 9 anterior se puede disponer de un esquema eléctrico equivalente de una estructura de torres de líneas de transmisión donde se aprecian todos los elementos que la componen.

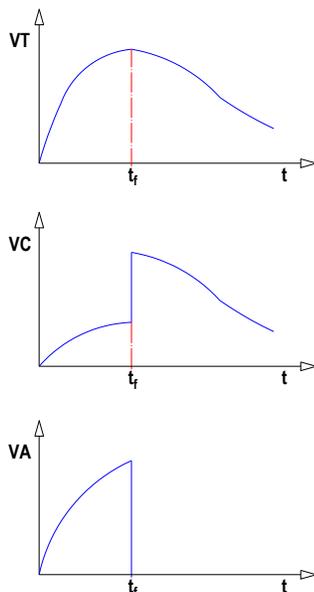


Figura 10. Voltaje en aisladores debido al flameo inverso

En la figura 10 se puede disponer de una grafica que representan los voltajes que se describen en la figura 9 equivalentes de una estructura de torres de líneas de transmisión, en la primera grafica se observa la onda producida por la descarga atmosférica que alcanza el voltaje VT, en la segunda grafica tenemos el voltaje existe en el conductor Vc y por ultimo en la tercera grafica se representa el voltaje resultante de la resta de las graficas anteriores, es decir, el voltaje en la cadena de aisladores Va.

Como se puede apreciar en la grafica en valor d voltaje en la cadena de aisladores será:

$$Va = VT - Vc$$

Para obtener un número de salidas de la línea aceptable, la resistencia de puesta a tierra debe ser lo más baja posible de forma que el voltaje de aislamiento no sea superado por el fenómeno de flameo inverso, más aún cuando el nivel cerámico o de descargas atmosféricas en la ubicación del tendido de las líneas de transmisión sea muy alto.

El flameo inverso que también es conocido como descarga retroactiva del ingles back flashover, como hemos descrito antes es un fenómeno que se forma en la cadena de aisladores cuando una descarga atmosférica incide directamente en la torre de transmisión, esta descarga produce una corriente que desciende hacia el sistema de puesta a tierra, y si este no es capaz de disipar dicha corriente, la misma retorna por la torre generando un voltaje entre los conductores de línea y la cadena de aisladores provocando el flameo en los mismos, lo que afecta la confiabilidad de los conductores de línea induciendo daños como salidas del sistema.

Este fenómeno de flameo inverso puede aparecer desde los cables o hilos de guarda o descarga directamente en la torre, no obstante, los flámeos

entre los cables de guarda y los conductores de línea son muy raros.

El proceso de flameo inverso depende de varios factores, uno de los principales es la resistencia al pie de la torre la cual puede ser diseñada para obtener un índice de fallas por flameo Inverso.

Cuando se tiene una descarga atmosférica sobre el cable de guarda se generan ondas transitorias de corriente y voltaje que viajan hacia ambos lados del conductor. Al llegar la onda a un punto de cambio de impedancia, como lo es una torre, se producen ondas reflejadas y transmitidas en la punta de la torre, estas ondas crean diferencias de potencial en los aislamientos entre los conductores de tierra y los conductores de línea, en distintos puntos de la línea, estos puntos pueden ser a lo largo del claro o en los aisladores sostenidos en las torres.

El flámeo inverso en las líneas de transmisión es en mi opinión la falla más frecuente, debido a este fenómeno en los estudios de coordinación de aislamiento se consideran estos problemas causados por este fenómeno.

Por lo general se desprecian los flámeos inversos en los claros de las líneas de transmisión y se consideran los siguientes aspectos:

- Distancias conductor-conductor
- Distancias conductor-estructura.
- Separación entre torres de transmisión.
- Número de cables de guarda y su ubicación.
- Geometría de la estructura.
- Resistencia de conexión a tierra de la torre.
- Punto de incidencia del rayo.
- Distribución de amplitudes de corrientes de de la descarga atmosférica y formas de onda.
- Densidad de descargas atmosféricas a tierra de la zona.

- Voltaje de operación de la línea.

En el próximo boletín técnico continuaremos este interesante tema con la sección de sistemas de puesta a tierra de las torres para líneas de transmisión.