



SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA
GUTIÉRREZ

INGENIERÍA ELÉCTRICA

INFORME FINAL DEL PROYECTO DE RESIDENCIA PROFESIONAL

“ESTUDIO Y DIAGNOSTICO DEL SISTEMA DE TIERRAS EN LA LST SAB-73750-TXN”.

ALUMNO

EDWIN ESAÚ COELLO RUIZ 12270613

ASESOR INTERNO

M. EN C. RAFAEL MOTA GRAJALES

ASESOR EXTERNO

ING. ÁNGEL GABRIEL BUSTILLOS NUCAMENDI

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD
OFICINAS DE LÍNEAS DE SUBTRANSMISION (LST).

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS, DICIEMBRE 2016.

Índice

Pág.

1. Introducción.....	4
1.1 Antecedentes.	4
1.2 Estado del arte.	6
1.3 Justificación.	8
1.4 Objetivo.	8
1.4.1 Objetivo general.	8
1.4.2 Objetivos específico.	8
1.5 Metodología.	9
2. Fundamento teórico	11
2.1 Sistemas de tierras.	11
2.1.1 Diseño del sistema de tierra.	13
2.1.2 Tierra Física.	13
2.2 Superficie equipotencial.	14
2.3 Corrientes telúricas	15
2.4 Descarga atmosférica.	15
2.4.1 Corriente del rayo.	16
2.4.2 Caída de rayos sobre un conductor de fase.	17
2.4.3 Caída de rayos sobre las estructuras.	18
2.4.4 Efecto térmico.	19
2.5 La descarga retroactiva.	19
2.6 Nivel cerámico.	20
2.7 Sobretensiones inducidas.	22
2.8 Cálculo de aisladores de una línea de subtransmisión.	23
2.9 Cálculo del ángulo de blindaje del hilo de guarda.	23
2.10 Resistividad del terreno.	24
2.10.1 Métodos para la medición de la resistividad del terreno.	26
2.10.1.1 Método de Wenner.	26
2.10.1.2 Método de Schlumberger-Palmer	28
2.10.1.3 Método de medición de resistencia de una varilla.	28
2.10.1.4 Medida de resistividad sobre pavimentos o concreto.	29

2.11	Resistencia del sistema de tierra.....	30
2.11.1	Métodos para la medición de la resistencia del sistema de tierra. Medición en estructuras de alto voltaje.....	30
3.	Desarrollo.....	33
3.1	Historial de salidas en el sistema e identificación de fallas.....	33
3.1.1	Localización de todas las fallas registradas del 2011 a noviembre del 2016.	34
3.2	Medición del sistema de tierra en diferentes tipos de estructuras.	38
3.2.1	Trayectoria y características de la línea sometida al estudio.	39
3.2.2	Selección del equipo de medición a utilizar.....	40
3.2.3	Realización de las mediciones resistencia del sistema.	41
3.2.3.1	Mediciones con fluke 1625.	41
3.2.3.2	Mediciones con fluke 1630.	45
3.3	Posibles causas del incremento en disparos y propuesta de mejora.	46
3.4	Metodología para diagnóstico de tipo de mantenimiento de sistemas de puesta a tierra en las lst.	48
4.	Resultados.....	49
4.1	Resultados.	49
4.1.1	Mediciones en tabulador.	49
4.1.2	Resultados mediante formula.....	51
4.1.3	Resultados de todas las mediciones realizadas.	53
5.	Conclusiones.....	56
5.1	Conclusiones generales.	56
5.2	Experiencia adquirida.....	56
6.	Referencias Bibliográficas.....	57
	ANEXOS.....	58
	Anexo A.- Especificación CFE 00JL0-28.....	58
	Anexo B.- Tipos de estructuras.	60
	Anexo C: Bitácora de llenado de mediciones de campo con correcciones.	66
	Notas.....	67

1. Introducción

1.1 Antecedentes.

La vida se ve sometida a una serie de efectos externos que afectan la salud y que pueden llegar a causar la muerte prematura o repentina. Las más comunes son aquellos efectos que encontramos en nuestro lugar de trabajo, ya que como cualquiera tiene un riesgo dependiendo a las actividades que realicemos dentro de ello, sin considerar el cuidado que tenga cada trabajador para ejercerse dentro de su ámbito laboral. Sin embargo en ocasiones ocurren eventos del cual no somos responsables y que nos afecta directa o indirectamente en nuestra vida, tal es el caso cuando se trata de explicar o entender un fenómeno natural como lo es una tormenta eléctrica.

Como todo fenómeno natural, es un fenómeno eventual y no se pueden tomar medidas para que no sucedan, sin embargo por medio de la ingeniería se pueden tomar medidas precautorias para que los efectos que lo acompañan no sean una amenaza que afecte nuestra vida. La ingeniería que se encarga en salvaguardar la vida de todos los seres vivos, personas y/o animales, que se encuentren sobre o en las cercanías donde ocurre una descarga atmosférica, es la ingeniería de puesta a tierra, que se encarga de la eficaz transferencia de energía hacia la tierra de manera segura por medio de instalaciones eléctricas.

La prioridad principal de un buen sistema de tierras es procurar la vida, sin embargo en cuestiones de procesos, como tal es el caso en la electrificación de toda una línea de subtransmisión, que se encarga de llevar energía eléctrica de una subestación a otra, para que esta se redirija para su consumo en miles de hogares o industrias dentro de la ciudad, es primordial que no ocurran fallas en el sistema aun cuando agentes externos intervengan directa o indirectamente en el proceso.

Al ocurrir un rayo en una línea o en alguno de sus componentes de su estructura, o ya sea cerca de ella, esta se induce al campo magnético generado por el rayo, y al tener una gran cantidad de energía, mayor a su capacidad, esta energía busca una salida por donde drenarse, ahí es donde aparecen los electrodos de puesta a tierra conectados a la tierra natural, si no existe un buen sistema, toda esa energía rebota y vuelve a la línea en busca de un lugar donde poderse disipar. Al existir ese efecto rebote, se produce una falla. Estas fallas provocan pérdidas económicas y que exista desabasto de energía para los usuarios y daños en sus artículos conectados a la red como también daños para la empresa prestadora del servicio, que por lo general algunos de los componentes de las estructuras suelen dañarse.

Por lo general se presentan dos casos muy particulares, uno es cuando la incidencia del rayo ocurre en la proximidad de la línea, la cual conduce a *sobretensiones atmosféricas inducidas*

en la línea, y otro la incidencia directa del rayo en la estructura o en el hilo de guarda. Cuando el ángulo de protección del hilo de guarda no fue bien diseñado, el rayo puede incidir directamente en una de las fases o conductores activos, y cuando un rayo incide directamente en el sistema conduce a mayores sobretensiones que cuando incide en la proximidad del mismo, pudiendo ocasionar mayor daño.

De 2011 a noviembre del 2016 han ocurrido 208 fallas registradas como salidas de línea en el Sistema Integral Administración Distribución (SIAD) de la División de Distribución Sureste de CFE. De las cuales 152 han sido imputables al mantenimiento de la línea, sin embargo de ese número de fallas, 71 tienen la clave W-B03 que tiene registro de alto valor de resistencia a tierra, estas son casi la mitad de las fallas ocurridas desde hace 6 años, y vienen derivadas por un mal sistema de tierras. De ahí la relevancia que toma la ingeniería aplicada a la puesta a tierra en las líneas de subtransmision, ya que esto se traduce a una gran pérdida en tiempo y en horas de trabajo que se pudieron haber evitado, en su mayoría, si se hubiese contado con la conciencia de que la solución estaba en nuestras manos.

1.2 Estado del arte.

La vida del hombre siempre ha estado rodeado de muchas interrogantes desde el inicio de su existencia, y ha tratado de darse una explicación de cada una de ellas, ya sea empírica o por medio de la ciencia. La electricidad, en un principio, se consideraba como algo mítico por nuestros antecesores, que tuvieron el primer contacto con la electricidad por el único método en el que lo encontrábamos naturalmente, durante una descarga atmosférica. El hombre empezó a preguntarse acerca de la nueva naturaleza descubierta, pero debido a las pocas herramientas existentes en su época, no podía responderse con claridad.

En el siglo XVIII Benjamín Franklin realizó el primer estudio científico sobre este fenómeno, con su famoso experimento del cometa, demostró que las nubes de tormentas están cargadas eléctricamente y determinó que el rayo es una descarga eléctrica a gran escala. En sus experimentos con puntas metálicas, llegó a la conclusión de que la electricidad estática que se genera en las nubes de tormentas es descargada sobre montañas elevadas, árboles, estructuras, o cualquier otro objeto metálico. Estos resultados le permitieron anticipar el primer sistema de protección con base en terminales aéreas verticales, conocidas hasta hoy en día como electrodos de Franklin, cuyo objetivo es interponerse en la trayectoria del rayo y conducir la corriente por un camino fuera de peligro para los elementos que se desean proteger. La protección contra tormentas eléctricas basadas en electrodos de Franklin ofreció una solución práctica. Aun cuando el concepto era puramente empírico la técnica en el uso de los electrodos de Franklin fue mejorando y perfeccionándose con el paso del tiempo.

Un físico inglés llamado, Stephen Gray, dedicado al estudio de la astronomía, se interesó por la conductividad eléctrica, y después de haber llevado a cabo, el 14 de julio de 1729, el experimento de la conducción de electricidad a través de un cordón cableado de 200 metros de longitud, surgió la pregunta de ¿Qué sucederá cuando se use a una persona como conductor de la electricidad? El 16 de julio de 1731, realizó tal experimento, utilizando a un adolescente como conductor, y en 1732, repitió el ensayo, pero usando esta vez a dos muchachos en serie como conductor.

En 1734, el investigador Charles François de Cisternay Du Fay dedicó su vida al estudio de los fenómenos eléctricos y también realizó el experimento de Gray. En ese experimento, el mismo fue suspendido horizontalmente y electrificado; durante el desarrollo del mismo, un hecho fortuito le planteó nuevas interrogantes: el asistente, que se encontraba parado sobre el suelo, acercó casualmente su mano a la de Du Fay y entonces, entre las manos se estableció una “chispa de fuego”, acompañada de una sensación de piquete y de un ardiente dolor, según lo reportó a la academia real de ciencia. De esta manera inadvertida ellos fueron los primeros hombres en experimentar un contacto a tierra artificial.

En 1883 Carl August Steinheil comprobó que la tierra conducía también la electricidad y que, por lo tanto, podía ser utilizada como un circuito de retorno de ésta, esto ayudó en el

desarrollo de la telegrafía por hilo y sentó las bases para iniciar la técnica de puesta a tierra, en un principio, dentro del campo de las comunicaciones eléctricas.

Durante más de una década, muchos otros hombres se dedicaron al estudio de los efectos de la corriente eléctrica por el cuerpo humano, destaca el Dr. Heinrich Friedrich Weber, quien en 1897, en la ciudad de Zúrich, llevo a cabo una serie de experimentos importantes acerca de los efectos de la electricidad sobre el cuerpo humano respecto al tiempo de permanencia de la corriente. Estas fueron los primeros trabajos como investigaciones bajo un sistema, validadas para servir como base a futuras investigaciones y acciones relacionadas. Por ello, su investigación fue considerada en las prescripciones sobre la puesta a tierra dentro de instalaciones electrotécnicas de la Asociación de Electrotécnicos Alemanes (VDE) del año de 1904.

Fue en 1918 cuando C. S. Peters presento por medio de la U. S. Bureau of Standard, Technical Paper N° 108, un instructivo relativo a la puesta a tierra en los sistemas eléctricos que impulso las acciones tendientes a la integración de una normalización para abordar y resolver de manera ordenada los problemas relacionados con la puesta a tierra. Como anteriormente en las prescripciones de la VDE se mencionan algunas recomendaciones en relación a la puesta a tierra pero hasta 1924 se incluyeron algunos lineamientos para la medición de las instalaciones de puesta a tierra.

Franz Ollendorf fue el investigador con un enfoque más preciso en los problemas de la puesta a tierra, ya que se basó en organizar todas las demás hipótesis e investigaciones que existían, exponiéndolo en un libro llamado *Erdstroeme: corrientes telúricas* editado en Berlín en 1928 y posteriormente su segunda edición en 1961.

En 1977 S. Rusck, presento en la revista *Lightning* una solución analítica del fenómeno de sobretensiones inducidas por un rayo en el sistema al incidir en su proximidad, considerando las cargas que el rayo induce al acercarse, pero sin haber llegado aún a la Tierra, al igual que las cargas inducidas después de haber llegado a ella.

La ingeniería de puesta a tierra no es algo sin importancia, al contrario, es de gran relevancia dentro de un sistema eléctrico, ya que sus fundamentos científicos y tecnológicos no están divulgados y por lo tanto no son comunes, y eso hace que sea más difícil de comprender de forma correcta cuando se le quiere ver a la ligera, ya que es una tecnología muy compleja por estar integrada por muchos elementos provenientes de diversas ciencias.

Lo que en este trabajo se propone como proyecto es realizar un estudio siguiendo una metodología adecuada bien fundamentada en un métodos científico y no solo en subjetivismos, técnicas empíricas no comprobadas o paradigmas, para así resolver la problemática de fallas en las líneas de subtransmision basándome en el análisis de una sola línea con mayor incidencia de disparos en los últimos tiempos.

1.3 Justificación.

La realización de este proyecto es de gran relevancia por la necesidad de retomar la implementación de ingeniería en algo con tanto valor dentro de la electricidad como lo es un sistema de tierras, por lo que es muy importante realizar un análisis de campo y científico para un diagnóstico acertado y una interpretación de las posibles causas de las fallas registradas durante un periodo, además saber el estado estructural en el que se encuentran las líneas, así como el riesgo que corren los humanos o cualquier especie y vegetación que puede estar expuesto al tener un mal sistema de drenado de excesos de energía.

Se necesita recabar información acerca de fallas ocurridas desde 2011 a la fecha y así hacer una estadística de los registros de las posibles fallas y los motivos de las mismas. Además buscar registros de mediciones de las líneas para hacer una comparación con las futuras mediciones que se realizaran en este proyecto y saber si las implementaciones de mejoras al sistema de tierra funcionaron o se mantuvo bajo la misma tendencia.

La finalidad de obtener datos es saber el estado en que se están las estructuras de la línea e identificar en qué puntos es más vulnerable el sistema en caso de una descarga atmosférica, posteriormente realizar una metodología de mantenimiento o mejoras en caso de que el sistema tenga un mal funcionamiento y así poder implementarlo para garantizar el menor número de interrupciones de energía o daño en las estructuras.

1.4 Objetivo.

1.4.1 Objetivo general.

Estudiar el sistema de tierras de la línea SAB-73750-TXN.

1.4.2 Objetivos específico.

Realizar una recopilación de todas las fallas registradas desde 2011 a la fecha, identificar el tipo de falla y el lugar en donde ocurrió.

Realizar una investigación de campo recabando información y haciendo mediciones para saber del estado actual en el que se encuentra el sistema de tierras e identificar las estructuras más críticas de la línea.

Comparar las mediciones obtenidas con las que estas prescritas en la normal de cfe y dar un diagnóstico de la problemática que se tiene y una posible solución.

Implementar una metodología practica para el análisis del sistema de tierra de las estructuras de la línea SAB-73750-TXN para prevenir posibles fallas en caso de descargas atmosféricas.

1.5 Metodología.

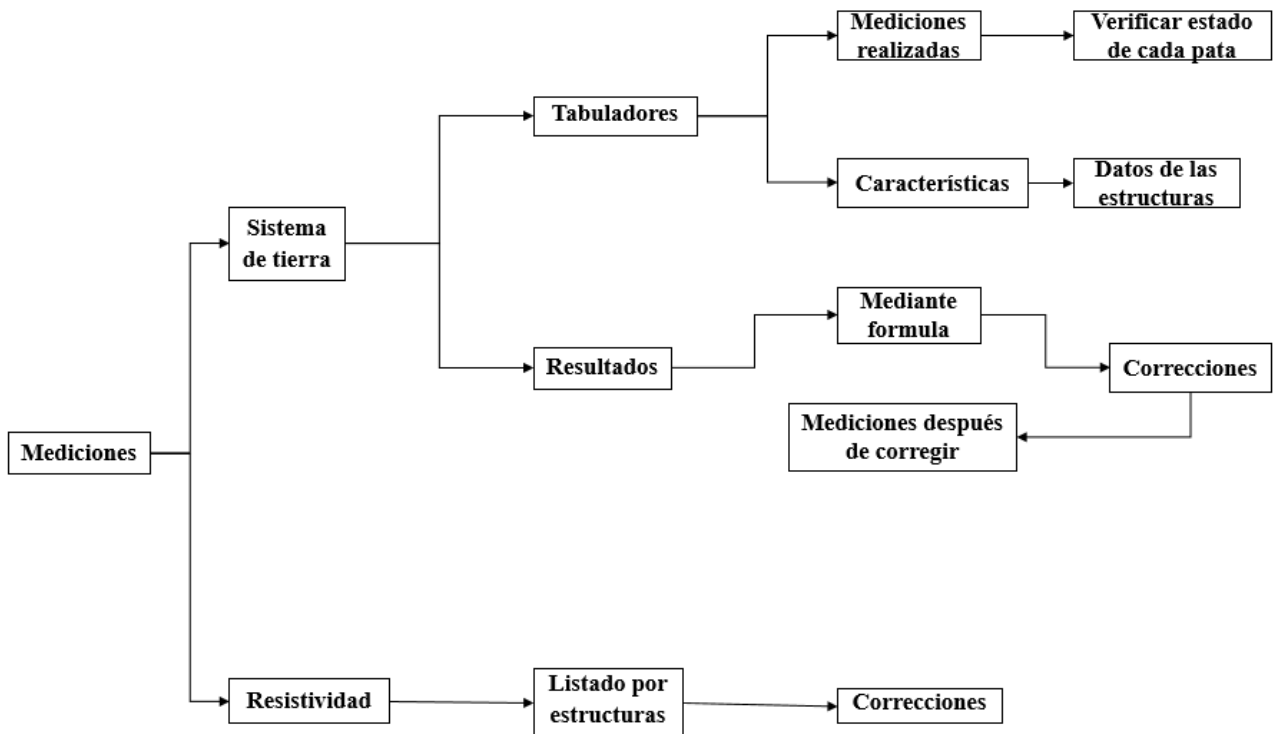


Figura 1. Diagrama a bloques del proceso.

Mediciones: De acuerdo al historial de la estructura o al reporte de patrullaje en la línea, identificar el tipo de medición requerida para no tener amenazas al sistema.

Sistema de tierra: En caso de un disparo realizar mediciones del sistema de tierra para descartar un mal funcionamiento y que sea la causa de la falla.

- **Tabuladores:** Se realizara el llenado de tabuladores donde se llevara un control de las mediciones, de los cálculos y de un tabulador donde se encuentran las características.
- **Mediciones realizadas:** El primer tabulador es el que se realiza en campo, en el momento de hacer las mediciones al pie de las estructuras.
- **Verificar estado de cada pata:** En cada medición es importante identificar posibles causas de fallas por su alta resistencia del sistema de cada pata a tierra.
- **Características:** Este tabulador es en donde muestra las características de los demás componentes del sistema sistema.
- **Resultados:** Se muestran los resultados del promedio de cada pata y se le aplicara una fórmula para saber la resistencia del sistema.

- **Correcciones:** En la hipótesis de requerir correcciones o mejoras al sistema, se deberán realizar en el menor tiempo posible y priorizando aquellas que presenten una falla por descarga atm.
- **Mediciones después de corregir:** Se deberá volver a medir el sistema después de corregido y realizar el llenado de un tabulador especial mostrado en el anexo C.

Resistividad: Debido a las dimensiones del equipo y del estado del terreno en donde se encuentran las estructuras, únicamente se medirá la resistividad del terreno en caso de que estos factores sean apropiados.

- **Listado por estructuras:** Identificación de las estructuras que pueden ser objeto del estudio.
- **Correcciones:** En caso de una falla por descarga atmosférica y de que el terreno sea apropiado para poder realizar mediciones, esto se llevara a cabo, para posteriormente realizar mejoras de ser necesario.

2. Fundamento teórico

2.1 Sistemas de tierras.

La puesta a tierra de los equipos se refiere a la conexión intencional de las carcasas, bastidores o estructuras metálicas no portadores o transmisores de corriente de los mismos, para lograr los siguientes propósitos:

- Mantener una diferencia de voltaje baja entre las diferentes estructuras metálicas con lo que se busca resguardar al personal de cualquier choque eléctrico. En el momento de una falla de un elemento energizado a un bastidor, el voltaje de dicho bastidor tiende a igualarse al del conductor energizado, si el primero no está debidamente conectado a tierra.
- Evitar incendios provocados por materiales volátiles o la combustión de gases al proveer un camino efectivo y seguro para la circulación de corrientes de falla y descargas atmosféricas y estáticas y así eliminar los arcos y elevadas temperaturas en los equipos eléctricos, que pueden provocar tales incendios.
- Mantener los voltajes del sistema dentro de límites razonables bajo condiciones de falla (tales como descarga atmosférica, ondas de maniobra o contacto inadvertido con sistemas de voltaje mayor), y asegurar que no se excedan los voltajes de ruptura dieléctrica de las aislaciones.

La puesta a tierra de un sistema eléctrico es esencial para la seguridad de las personas y para su funcionamiento adecuado, incluso es requerida por las autoridades en cumplimiento de la norma NOM-022-STPS-1999, referida a la electricidad estática en los centros de trabajo. Un dispositivo de protección generalmente se conecta entre una parte viva (cualquier elemento capaz de conducir una corriente) y la tierra del sistema para limitar los sobre voltajes que ocurren entre la parte viva y tierra a un valor definido. Sin embargo, si no hay una correcta implementación del sistema de tierra, existirán puntos de no equipotencialidad, causando fallas en la instalación en general. La resistencia eléctrica total del sistema de tierra, debe conservarse en un valor menor a 25Ω , para subestaciones hasta 250 KVA y 34.5 KV., 10Ω en subestaciones mayores a 250 KVA y 34.5 KV y de 5Ω , en subestaciones que operen con tensiones mayores a los 34.5 KV. Las características esenciales para cualquier dispositivo de protección son las siguientes:

- La operación no debe interferir con el comportamiento del sistema y tampoco producir voltajes anormales en el equipo instalado.
- El nivel de protección debe ser independiente del frente y la forma de onda, así como también de las condiciones ambientales y atmosféricas.

La instalación a tierra no es de capacidad infinita e impedancia nula. Sin embargo, la impedancia del sistema de tierra debiera ser lo bastante baja de modo que pueda fluir suficiente corriente de falla a tierra para que operen correctamente los dispositivos de

protección, los cuales a su vez provocarán la operación de interruptores o fusibles para interrumpir el flujo de corriente.

Muchas instalaciones eléctricas están propensas al riesgo de daño como resultado del impacto de un rayo y se requiere de arreglos especiales para reducir el riesgo involucrado. Debido a que un impulso de rayo tiene una pendiente de subida escarpada y es una fuente de corrientes de alta frecuencia, nuevamente son necesarios diseños especiales de sistemas de tierra. Por ejemplo, las curvas en los conductores de tierra forman una pequeña inductancia, la cual es insignificante a la frecuencia de potencia, pero puede crear una alta impedancia a la corriente de rayo. Esto puede ser suficiente para que ocurra una descarga de retorno (flashover) y la corriente prefiera fluir a tierra por otros caminos diferentes de la ruta diseñada posiblemente causando un daño significativo en el proceso.

Una instalación de puesta a tierra está constituida fundamentalmente por electrodos, que son los elementos metálicos que se introducen en el terreno y que facilitan el desahogo a tierra de cualquier carga eléctrica.

2.1.1 Diseño del sistema de tierra.

Los elementos principales del sistema de tierra son:

- Red o malla de conductores enterrados, a una profundidad que varía de 0.50 a 1 metro, tomando en cuenta la profundidad de menor resistividad del terreno.
- Electrodo o varillas de tierra conectados a la malla de conductores y enterrados para obtener el mínimo valor de resistencia a tierra.
- Conductores de puesta a tierra, a través de los cuales se hace la conexión a tierra de las partes de la instalación o del equipo.
- Conectores que pueden ser mecánicos, a compresión y soldables.

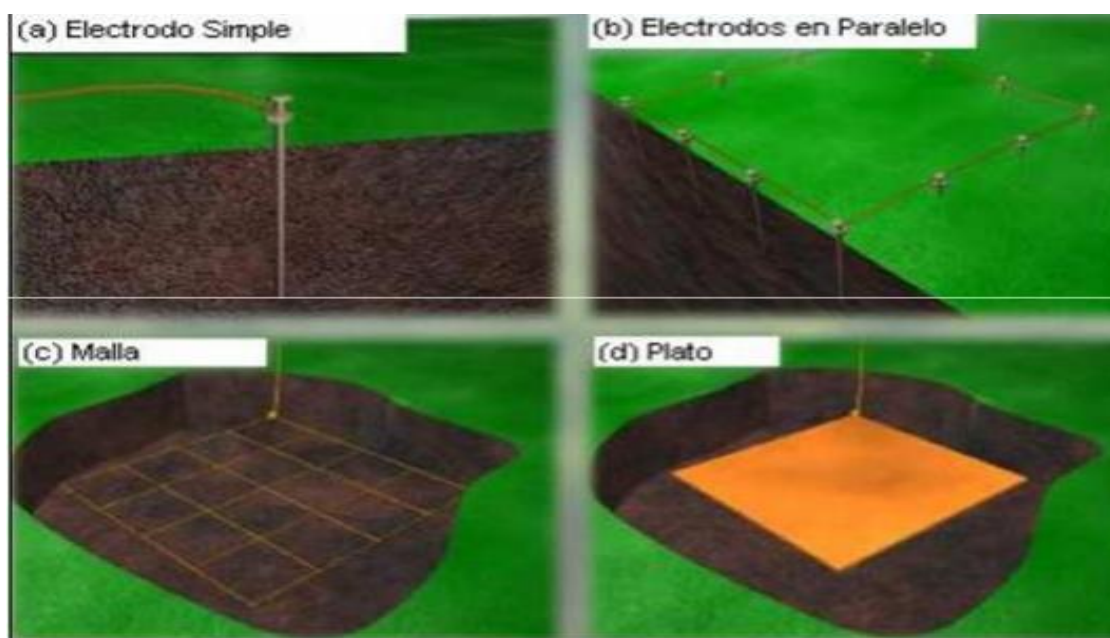


Figura 2. Tipos de mallas de tierra

2.1.2 Tierra Física

La Tierra Física o Sistema del electrodo de tierra, sirven para aumentar la longitud del conductor del sistema de tierra en terrenos pequeños y en terrenos secos para encontrar zonas con menor resistividad, esto consiste en la conexión física de un sistema eléctrico a un electrodo metálico bajo tierra. El electrodo de tierra consiste en un objeto metálico cuya composición física es de tubos o varillas de hierro galvanizado que no deben tener una dimensión menor a 2.4m de longitud y se instalan de tal modo que por lo menos 2.4m de longitud estén en contacto con la tierra, de acuerdo a la Norma Mexicana ANCE NMX-J-661-ANCE-2013, son utilizados en terrenos cuyas propiedades químicas no deterioran a sus materiales.

Los electrodos más confiables son aquellos que se constituyen de una varilla de hierro enfundada en una lámina de cobre. Este tipo de electrodo es utilizado en terrenos cuyos compuestos son más corrosivos, ya que tiene una excelente resistencia a la corrosión además de buena conductividad y buena resistencia mecánica para ser clavado en el terreno. Poner en práctica la instalación de electrodos de tierra está aprobada por la normatividad en México, por ello, actualmente en CFE es el electrodo “Copperweld” con el cual se utiliza en el campo de trabajo. Su función primordial es introducir las corrientes de falla dentro del seno de la tierra.

Cuando la roca está a menos de 2.40 m, estos electrodos pueden meterse en diagonal hasta con un ángulo de 45 grados de la vertical. Pero, si no es este el caso, se deben enterrar horizontales en una trinchera abierta para tal caso a 800 mm de profundidad por lo menos.

La eficiencia de un electrodo enterrado es evaluada en términos de resistencia.

La eficiencia de un electrodo enterrado (varilla copperweld, anillo, malla, etc.) es evaluada en términos de resistencia. La resistencia de contacto de una varilla está dada por la fórmula de Dwight:

$$R = \frac{\rho}{2 * \pi * l} \left[\ln \left(4 * \frac{L}{r} \right) \right] - 1 \dots (1)$$

Donde:

ρ es la resistividad del terreno en (Ω -m)

L es el largo de la varilla en (m)

r es el radio de la varilla en (m).

2.2 Superficie equipotencial.

Se define como una superficie equipotencial aquella que está compuesta de elementos entre los cuales no existe diferencia de potencial de voltaje. A este sistema equipotencial se le asigna un valor de voltaje cero. Al sistema equipotencial comúnmente también se le puede llamar tierra. La tierra hace la función de un conductor, operando en paralelo con los conductores metálicos, por ello se le designa como el cuarto conductor.

Uno de los primeros errores es en el cálculo de la sección de tierra que se utilizara para instalar el sistema de tierra, ya que se realiza suponiendo que el terreno es homogéneo, es decir, que tiene una misma naturaleza geológica y que presenta la misma conductividad natural en cualquier punto del volumen de terreno, despreciando la presencia de ciertos elementos dispares como las rocas dentro del suelo, lo cual ocasiona que la conductividad

efectiva resulte menor o mayor, por lo tanto el conductor de tierra debe sufrir modificaciones en su sección transversal y en la profundidad de su eje.

Cabe mencionar que la superficie de nuestro planeta, "la tierra", no necesariamente forma parte de la tierra de un sistema eléctrico. En un avión existe un sistema de distribución eléctrico, y también existe un sistema equipotencial o tierra que es totalmente independiente del voltaje de la superficie del planeta o tierra.

2.3 Corrientes telúricas

Las corrientes telúricas o de tierra son las corrientes eléctricas que se propagan a través de un sistema equipotencial; pueden ser distinguidas, según su naturaleza eléctrica con el siguiente orden:

- 1.- Estacionarias (corriente continua);
- 2.- Casi estacionarias o alternas lentas (corriente alterna 50/60 Hz);
- 3.- Alternas rápidas o de alta frecuencia (utilizadas en las telecomunicaciones).
- 4.- Corrientes que se propagan como ondas electromagnéticas de impulso (corriente de rayo).

En los sistemas de suministro de energía eléctrica como en las líneas de transmisión como de subtransmisión, una falla provoca la conexión a tierra de uno de los conductores activos trasapando la corriente de defecto a la tierra, que servirá como circuito de retorno. La corriente de retorno puede llegar a alcanzar magnitudes muy elevadas, tal hecho causara disturbios del potencial entre las fases del sistema y a toda la operación de la línea, originando la salida de servicio de la misma.

Si bien existen sistemas eléctricos que no utilizan a la tierra como conductor, existe un grave problema de acoplamiento electromagnético del terreno vecino con líneas de transporte de energía eléctrica en alta tensión en corriente alterna. Por ello el dominio del conocimiento de las corrientes telúricas en la vecindad de sistemas de telecomunicaciones de energía representa una parte importante de su planeación y operación eficiente ya que al ser alimentados con corriente eléctrica sus medios de servicio quedan expuestos a corrientes de defecto, sobretensiones y descargas externas.

2.4 Descarga atmosférica.

Todo empieza desde una nube de tormenta cuya cargas eléctricas se encuentran distribuidas, pero no en forma homogénea. Entre las concentraciones de cargas de la nube, principalmente en la zona inferior, comienzan a ocurrir pequeñas descargas eléctricas. Como consecuencia de la ionización por choque, se va formando una gran cantidad de cargas eléctricas, las cuales disminuyen la rigidez dieléctrica.

El gradiente eléctrico en tierra pertenece a 100 V/cm y el gradiente eléctrico en la nube se aproxima al valor en estado crítico de 5 kV/cm, por eso es que la descarga provenga siempre de la nube y no de la tierra.

Las estadísticas arrojan los siguientes valores para el rayo.

- Del 60% al 95% de los rayos que caen en la tierra son electronegativos, lo que hace suponer que el rayo proviene de la parte inferior de la nube.
- La duración promedio de un rayo es de 0.15 segundos. La duración máxima no excede de 1.5 segundos.
- Se supone que en la tierra caen aproximadamente 100 rayos por segundos.
- El 50% de las descargas atmosféricas tiene una intensidad de corriente inferior a los 20 kA.
- El 5% de los rayos que caen en la tierra acusa intensidades de corriente de hasta 160 kA, habiéndose registrado descargas de corriente de hasta 400kA. Estos elevados valores conllevan al peligro de descarga retroactiva.
- La energía de un rayo es aproximadamente de 10 a 100kWh, pero con una potencia destructiva de 10^7 a 10^9 kW.

2.4.1 Corriente del rayo.

Según Williams, el rayo puede transferir típicamente 1020 electrones en una fracción de segundo, desarrollando una corriente de pico de hasta 10 kiloamperios.

Según Uman, el científico alemán Pockels descubrió en 1897 una roca de basalto en las proximidades de la caída de un rayo que fue magnetizada y dedujo una corriente del orden de 10.000 Amperios. Pockels presumiblemente midió los efectos magnéticos de las altas corrientes sobre la roca de asfalto, y posteriormente pudo escalar los resultados de este experimento para calcular la corriente asociada con el rayo. Basado en ese principio, los vínculos magnéticos se han usado de manera extensa para el cálculo de la corriente en los rayos. La mayoría de las medidas han estado en el rango de 5.000 a 20.000 amperios.

Por lo general, en un determinado "stroke", la corriente del rayo cesa en alrededor de una milésima de segundo, pero a veces hay una corriente continua del orden de 100 amperios después de una o más de los "strokes". A esto se le llama "rayo caliente" y según Uman es la causa de los fuegos por rayos. La temperatura de los rayos es de 15.000 - 60.000 °F en ambos rayos "frio" y "caliente".

2.4.2 Caída de rayos sobre un conductor de fase.

La incidencia de rayos sobre un conductor de fase, puede darse por la ausencia de blindaje en la línea o bien porque el mismo es deficiente. Si el rayo cae sobre un conductor de fase se originan dos ondas de corriente que viajan en direcciones opuestas y de valor igual a la mitad de la corriente del rayo. Corriente que producen dos ondas de tensión cuya amplitud es función de la impedancia característica de la línea. Esta tensión puede provocar fallas en las líneas o la interrupción del servicio eléctrico, se calcula por la siguiente relación:

$$\mathbf{V_{cond} = \frac{1}{2} I (t) * Z_c \dots (2)}$$

Donde:

V_{cond}: Es el voltaje de sobretensión en el conductor de fase.

I (t): Es la corriente de rayo.

Z_c (Ω) la impedancia característica del conductor de fase alcanzado por el rayo y se calcula por la siguiente expresión:

$$\mathbf{Z_c = 60 \ln (2y/re) \ (\Omega) \dots (3)}$$

Donde:

y: Es la altura media del conductor entre estructuras (vano) y se calcula con las siguientes expresiones en función del tipo de terreno:

$$\mathbf{y = h - \frac{2}{3} f_c} \quad \text{Para terreno plano.}$$

$$\mathbf{y = h} \quad \text{Para terreno ondulado.}$$

$$\mathbf{y = 2 * h} \quad \text{Para terreno montañoso.}$$

Donde:

h es la altura del conductor en la estructura o torre.

f_c la flecha del conductor de fase.

De la misma manera:

$$\mathbf{re = R_h n \sqrt{n * rs/R_h} \dots (4)}$$

Donde:

re: Es el radio equivalente del conjunto o haz de conductores de fase (radio medio geométrico). Para un solo conductor de fase $r_e = 6$ cm para tomar en cuenta la atenuación por efecto corona.

n es el número de subconductores de fase.

rs: radio de un subconductor.

Rh el radio del grupo o haz de conductores de fase, la cual se calcula por la siguiente expresión:

$$R_h = \frac{s}{2 * \text{sen}(\pi/n)} \quad \dots (5)$$

Donde:

S: es la separación entre el haz de subconductores de fase.

Si la tensión en los conductores fase (Vcond) es alta y mayor a la tensión de ruptura dieléctrica del aislamiento apoyo-conductor, se origina un arco o una tensión sobre los apoyos de línea, denominada tensión crítica de flameo. Este voltaje se determina por la siguiente expresión:

$$V_{\text{flameo}} = Z_{\text{eq}} * I_{\text{rayo}} \quad \text{y} \quad Z_{\text{eq}} = (1/Z_T + 1/Z_c + 1/Z_g) \quad \dots (6)$$

Donde:

Zeq: Es la impedancia equivalente.

ZT: La impedancia de la torre.

Zc: La impedancia del conductor de fase.

Zg: La impedancia del hilo de guarda.

2.4.3 Caída de rayos sobre las estructuras.

Cuando un rayo cae sobre una estructura metálica, la corriente de rayo circula por ésta y a través del cable de puesta a tierra. Así mismo, esta corriente genera una sobretensión en la estructura que es función de la intensidad de la descarga y de la impedancia característica del conjunto torre e hilo de puesta a tierra. La sobretensión se calcula por la siguiente expresión:

$$V_T = Z_T * I_{\text{rayo}} \quad (\text{KV}) \quad \dots (7)$$

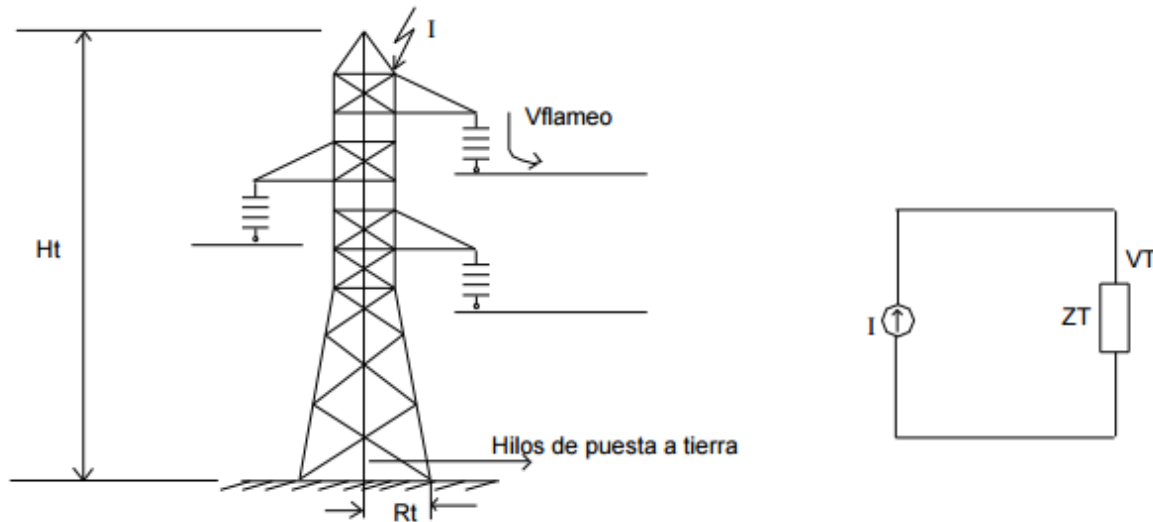


Figura 3. Impacto del rayo sobre la torre y circuito equivalente

2.4.4 Efecto térmico.

Toda intensidad de corriente, al pasar por una resistencia, produce la siguiente potencia térmica de disipación: $P=I^2 \cdot R$ (8)

El calor que se disipa es proporcional al tiempo de acción de la intensidad de corriente. Despreciando la derivada respectiva se puede suponer la temperatura del conductor proporcional al tiempo de acción.

La energía disipada será: $dW=u \cdot i \cdot dt$ (9)

En la práctica el tiempo de acción promedio no excede, por lo general los $120\mu s$.

2.5 La descarga retroactiva.

Cuando una descarga atmosférica incide en forma directa en una de las estructuras del sistema o en los conductores. Ambos casos extremos que se pueden presentar son aquellos en el que el rayo caiga a mitad de vano o en la punta de la estructura. El caso más grave es cuando el rayo impacta en la punta de la estructura, ya que en este caso la estructura afecta deriva a tierra 60% de la corriente del rayo. El resto es derivado entonces a tierra por las estructuras vecinas. Sin embargo, por lo general el hilo de guarda se encuentra espacialmente por encima del plano de los conductores activos, y el rayo comúnmente incide en éste, actuando casi de inmediato el contacto a tierra de las estructuras contiguas.

Es muy importante, en términos eléctricos y para fines de seguridad, la derivación de la corriente del rayo a tierra por medio de la estructura metálica de la estructura, provocando una apreciable caída de tensión V en la resistencia de puesta a tierra de la estructura.

Esta caída de tensión está dada por la ley de Ohm.

$$V=I \cdot R \quad \dots (10)$$

La tensión total que tiene que soportar la línea en caso de una descarga atmosférica es:

$$V=I \cdot R + L \left(\frac{di}{dt} \right) - u_k + u_i \pm u_n \dots (11)$$

Donde:

$L \left(\frac{di}{dt} \right)$ es la caída de tensión debida a la inductancia de la estructura.

u_k es la tensión transferida por el hilo de guarda al conductor activo en cuestión.

u_i es la tensión inducida por el rayo con el conductor activo en consideración.

u_n es el valor momentáneo, con su perspectiva polaridad, de la tensión nominal.

Cuando la caída de tensión en la resistencia de puesta a tierra de la estructura (U_M) excede a la tensión de choque de interrupción U_C del aislador, se produce una descarga entre la estructura y el conductor activo. Es decir, entre la masa metálica de la estructura, que se encuentra conectada a tierra, y una de las fases. A este fenómeno se le denomina descarga retroactiva.

Las sobretensiones máximas de esta naturaleza se observan en los postes de madera cuando un rayo incide en forma franca en ellos.

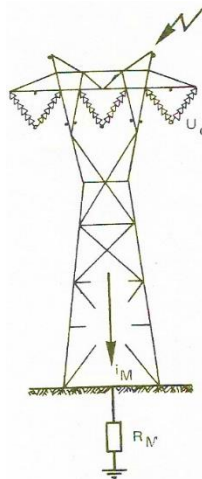


Figura 4. Esquema de la descarga retroactiva.

2.6 Nivel cerámico.

El nivel cerámico es el número de días promedio por año, que al menos, se oye un trueno o que exista actividad de tormentas eléctricas en una región determinada. Nombre utilizado por los meteorólogos, para referirse a la actividad eléctrica en la atmósfera (rayos y truenos).

Las tormentas eléctricas pueden ser definida como un conjunto de fenómenos electromagnéticos, que dan lugar a la propagación de sonidos y efectos luminosos que ocurren en el momento de una descarga electroatmosférica.

Las regiones próximas al Ecuador, presentan un nivel cerámico muy alto. Sin embargo, en los continentes y océanos la presencia de la misma es baja, debido a los vientos del norte que tienden a mover las nubes hacia el océano Pacífico.

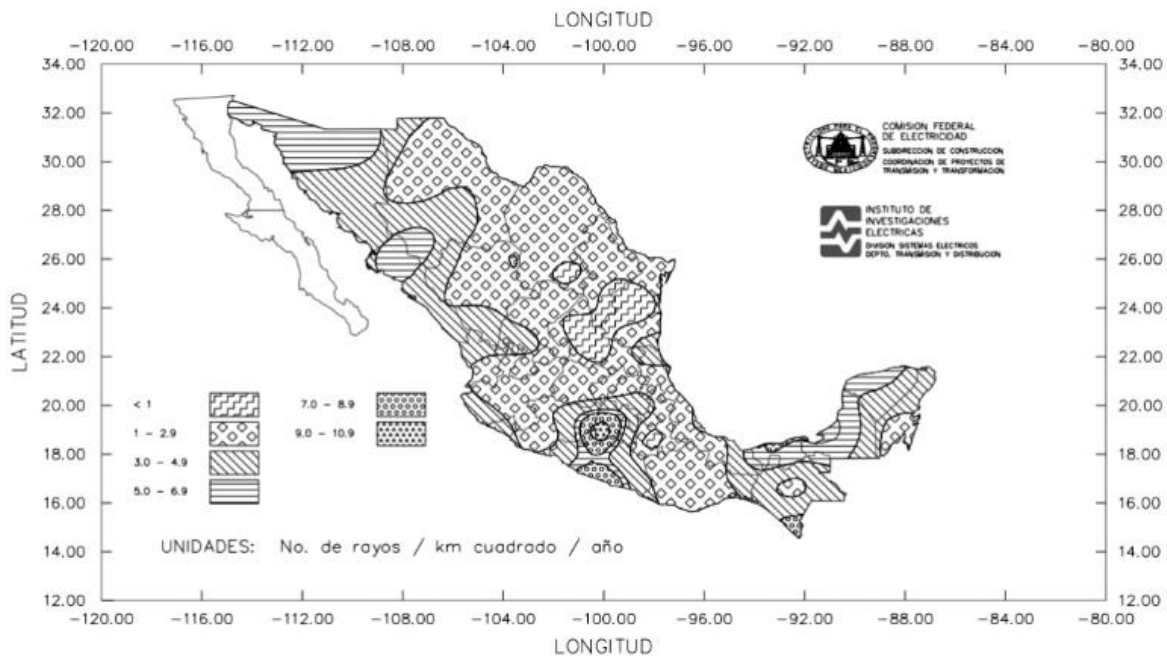


Figura 5. Mapa promedio anual de densidad de rayos a tierra en los estados de la República Mexicana.

Se muestran las isoceras para evaluar la densidad de rayos a tierra (DRT) en cada estado de la república mexicana.

Las isoceras representan el promedio anual de dicho periodo. Las unidades de la DRT son rayos/km²/año.

El valor de cada isocera es de 0.25 y debe tomarse el nivel superior de la isocera que corresponde a la ubicación de la instalación a proteger.

Para calcular los niveles isocerámicos del año analizado se pueden utilizar las siguientes ecuaciones:

$$N_g = aT_d^b \dots (12)$$

$$GSD = 5,4 \times 10^{-7} * LAT^{1.6} * TD^{2.5} \dots (13)$$

$$GSD = 176 * LAT^{-3.8} * TD \dots (14)$$

Donde:

N_g y GSD son la densidad de descargas a tierra.

TD y T_d son los días de tormenta al año.

LAT es la latitud a la cual se aplica las dos últimas ecuaciones, que para este estudio se utiliza un valor promedio de la latitud del área bajo análisis.

a= área de de descarga

b= densidad de descarga

2.7 Sobretensiones inducidas.

Al realizar el análisis de las sobretensiones inducidas por el rayo en el sistema podemos imaginar la incidencia de un rayo en las proximidades de una estructura, es decir un impacto indirecto, y se deben considerar las cargas que el rayo induce al acercarse al sistema, pero sin haber llegado aún a la tierra, al igual que las cargas inducidas después de haber llegado a ella. La descarga de retorno lleva de nuevo al seno de la nube una gran cantidad de cargas eléctricas.

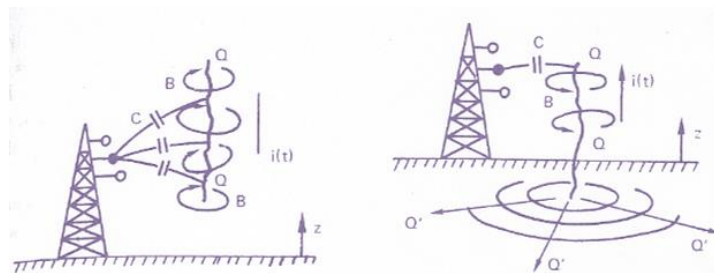


Figura 6. Diagrama sobretensiones inducidas por el rayo en una estructura.

La solución analítica completa del fenómeno de sobretensiones inducidas fue presentada en 1977 por primera vez por S. Rusck en la revista *Lightning*, basándose en las Leyes de Maxwell. El vector de campo inducido por el fenómeno atmosférico está dado por

$$\mathbf{E} = - \text{grad}U_i - \delta \mathbf{A} / \delta t \quad \dots (15)$$

Donde:

U_i es el potencial escalar de la carga eléctrica a lo largo del canal plasmático de la descarga atmosférica.

A es el potencial vectorial de la corriente de descarga del rayo.

Las sobretensiones inducidas por el rayo en el sistema no alcanzan valores muy peligrosos, pero si las tensiones de paso y de toque en la proximidad del sitio de incidencia. Estas tensiones suelen ser tan elevadas que con frecuencia conllevan a accidentes fatales. Los afectados con más frecuencia son los cuadrúpedos tales como vacas, caballos y en menor grado perros, y también el hombre.

2.8 Cálculo de aisladores de una línea de subtransmisión.

Para el cálculo de número de aisladores se debe considerar la distancia de fase a tierra por sobretensiones de rayo, para obtener una coordinación de aislamiento adecuado en la línea, la que se determina por la siguiente expresión:

$$V_{50\%} = K * d \text{ (KV) } \dots (16)$$

Donde:

$V_{50\%}$: es la tensión crítica de flameo y se corrige por altura arriba de los 1000 m.s.n.m...

K : Corresponde al factor del electrodo de tierra y está en el rango de 500 a 600 KV/m, para fines de cálculo se puede tomar como 550 KV/m.

d : La distancia de fase a tierra equivalente a la longitud de la cadena de aisladores en metros.

Para los cálculos de número de cadena de aisladores, se utiliza la siguiente relación:

$$N^{\circ} \text{ DE AISLADORES} = d/L \dots (17)$$

Donde:

L : Es la altura de un aislador en centímetros o metros. Aisladores que pueden ser del tipo suspensión.

2.9 Cálculo del ángulo de blindaje del hilo de guarda.

La probabilidad de que un rayo incida sobre un conductor de fase, viene fuertemente influenciada por la posición que tengan los cables de guarda; ésta se define normalmente por lo que se conoce como el ángulo de blindaje o apantallamiento de una línea de transmisión.

El cálculo del riesgo de falla por blindaje y el ángulo de protección para un blindaje total se determina por el método de modelo electrogeométrico de comportamiento del rayo. Este método establece que no todos los rayos que inciden sobre un conductor de fase producen falla.

Para que exista una falla es necesario que la magnitud de la corriente de rayo sea tal, que produzca una tensión ($I_{\text{rayo}}/2 * Z_c$) superior a la ruptura dieléctrica del aislamiento o cebado inverso (flameo) del arreglo apoyo-conducto. Es decir, que sólo los rayos de intensidad superior a un cierto valor crítico I_c , darán lugar a flameo si caen sobre un conductor de fase. La corriente es calculada por la siguiente expresión:

$$I_c = \frac{2 V_{co} \%}{Z_c} \dots (18)$$

Donde:

I_c : es la corriente de rayo que produce flameo.

$$V_{co\%} = V_{50\%} - 2.5 \sigma_c = 0.9 V_{50\%}$$

$V_{50\%}$: la tensión crítica de flameo.

σ_c : Es la desviación estándar con respecto a $V_{50\%}$ que toma el valor de 3% respecto al voltaje de flameo.

Si el blindaje es bueno, entonces la corriente del rayo es conducida a tierra, por los cables de guarda y a través de las estructuras, si la resistencia al pie es baja. Pero si lo anterior no es eficiente, entonces existen sobretensiones de retorno, que producen salidas excesivas de las líneas, especialmente en zonas de alto nivel cerámico.

2.10 Resistividad del terreno.

Se define la resistividad del suelo, como la resistencia medida en cubo de material, de un metro por lado, medido entre dos placas de metal colocadas sobre caras opuestas ohms-metro (Ω/m), o en ohms - centímetro (Ω/cm , que corresponde a la intensidad de un amperio que permite pasar un conductor de sección de un metro cuadrado y longitud de un metro, cuando se le aplica en sus caras opuestas una diferencia de potencial de un voltio (Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, 2013).

La resistividad del suelo es extremadamente variable de un lugar a otro y para un sitio dado. Los factores principales que determinan la resistividad son: el tipo de suelo, el contenido de humedad, las sales disueltas en el agua, la profundidad y la temperatura.

Lo más recomendable es realizar las pruebas en la época del año en que la sequía sea más intensa para obtener valores de resistividad críticamente bajos, ya que cuando es temporada de estiaje es cuando la resistividad es más elevada.

Tabla 1. Resistividad promedio en los diferentes tipos de suelos.

Naturaleza del suelo	Resistividad promedio ($\Omega.m$)
Terreno Húmedo o suelo orgánico	10 – 50
Terreno de cultivo o arcilloso	50 – 100
Tierra arenosa Húmeda	100 – 200
Tierra arenosa seca	200 – 1000
Tierra con guijarros y cemento	200 – 1000
Roca cristalina	50 – 500
Arena y grava	50 – 1000
Roca porosa	20 – 2000
Suelo rocoso húmedo	2000 – 3000
Granito basalto, etc.	1000
Roca compacta	10000

Para medir la resistividad del terreno es necesario hacer que circule una corriente a través de él, para lo cual se requiere insertar electrodos en el suelo que propicien tal circulación de corriente. El método generalmente utilizado es el de los cuatro electrodos desarrollado por el alemán Frank Wenner.

Cuando el valor de la resistividad del terreno donde se localiza la estructura es alto, es el de esperarse que la resistencia a tierra de ésta sea elevada y resulte por arriba del valor requerido.

Cuando estos casos se presentan, las resistencias deben mejorarse mediante cualquiera de los siguientes métodos:

- Varillas en contra antenaradiales.
- Varilla profundas.
- Electrodos de Bentonita; contra antenacontinuas, o ya sea modificar la composición química del terreno;
- Y en casos muy extremos de ser necesario, hacer una combinación de estos métodos.

2.10.1 Métodos para la medición de la resistividad del terreno.

En este punto es de vital importancia el análisis desde la perspectiva de la ingeniería en la transmisión o subtransmisión de la energía, ya que es un punto primordial para que exista un buen funcionamiento en los componentes de la estructura y así evitar posibles futuros problemas en caso de alguna falla. Aunque los componentes estén perfectamente bien armados, pero si hubo una mala elección del terreno o no se hicieron las debidas correcciones al terreno, no sirvió de nada, porque a un futuro cuando se requiera de que funcione el sistema de tierra, este no tendrá buen drenado de excesos de energía y esa energía ira de regreso dañando los componentes.

Las técnicas para medir la resistividad del suelo son en esencia las mismas, sin embargo la interpretación de los datos recolectados puede variar con suelos con resistividades no uniformes. Existen diferentes métodos para la medición de la resistividad del terreno en donde el objetivo principal es dar con certeza con el mejor lugar, eléctricamente hablando, para los fines que se requieren en el caso de la construcción de una estructura de subtransmisión de una LST.

2.10.1.1 Método de Wenner.

El método de los cuatro puntos de Wenner es el método más preciso y popular. Son razones para esto que: el método obtiene la resistividad del suelo para capas profundas sin enterrar los electrodos a dichas profundidades; no es necesario un equipo pesado para realizar las medidas; los resultados no son afectados por la resistencia de los electrodos auxiliares o los huecos creados para hincarlos en el terreno.

La resistividad del terreno es la cantidad geológica y física para el cálculo y diseño del sistema de conexión a masa. El procedimiento de medición aplicado más abajo usa el método desarrollado por Wenner (V. Wenner, A method of measuring earth resistivity (un método para la medición de la resistividad de la masa; Bull. National Bureau of Standards, Bulletin 12 (4), Paper 258, S 478-496; 1915/16)).

La medición de la resistividad del terreno se realizara con el Megger Fluke Earth/Ground Tester 1625, además de 4 puntas de masa de la misma longitud.

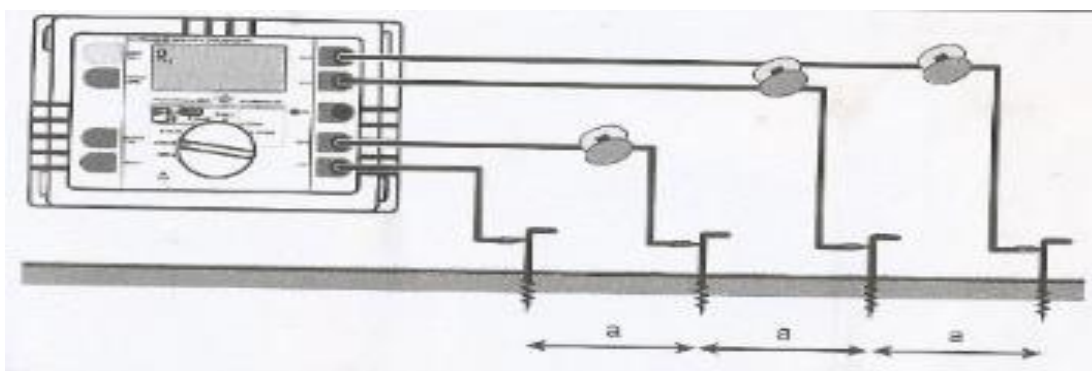


Figura 7. Medición de la resistividad del terreno.

La metodología a seguir es la siguiente:

1.- Se colocan las 4 puntas de masa en el terreno en línea recta y separadas a distancias iguales entre sí. Las puntas de masa no deben enterrarse más profundamente que un máximo de 1/3 de la distancia de la sonda.

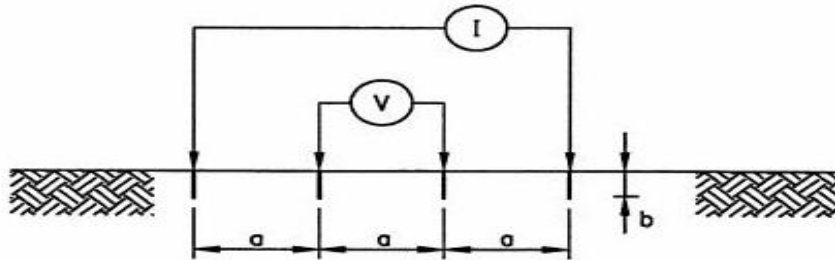


Figura 8. Circuito en la medición de la resistividad del terreno.

2.- Gire el selector central hasta la posición “R_E 4pole”.

3.- El cableado del instrumento debe realizarse de acuerdo con la figura 5.

4.- Presione el botón “START TEST”.

5.- Una corriente “I” se inyecta entre los dos electrodos externos y el potencial “V” entre los dos electrodos internos es medido por el instrumento. El instrumento mide la resistencia $R = (V/I)$ del volumen de suelo cilíndrico de radio de la distancia de la sonda encerrado entre los electrodos internos.

A partir del valor de la resistencia R_E, se calcula la resistividad aparente del terreno según la ecuación:

$$\rho_E = 2\pi * a * R_E \dots (19)$$

Donde:

ρ_E : valor medido de resistividad del terreno (Ωm)

R_E: Resistencia medida (Ω)

a: Distancia de sonda (m)

El método de medición según Wenner determina la resistividad del terreno a una profundidad de, aproximadamente, la distancia de sonda entre dos puntas de masa. Si se aumenta la distancia de sonda, se pueden medir y comprobar la homogeneidad de estratos más profundos. Cambiando la distancia de sonda varias veces, se puede medir un perfil a partir del cual es posible determinar un electrodo de masa adecuado.

2.10.1.2 Método de Schlumberger-Palmer

En este arreglo, al igual que en el de Wenner, los electrodos de emisión (corriente) y medición (tensión) están situados en línea recta, la variante de este arreglo radica en que la separación entre electrodos es, aunque simétrica, desigual para la correspondiente entre los electrodos de tensión y entre estos y los de corriente.

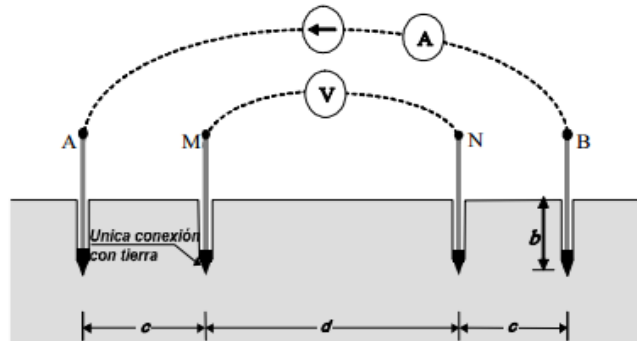


Figura 9. Método de Schlumberger-Palmer.

El procedimiento para obtener el modelo del terreno, consiste en separar progresivamente los electrodos, alrededor de un punto central permanente, denominado punto de máxima exploración. La fórmula con la cual se calcula la resistividad aparente del terreno es:

$$P = \pi c (c + d) R / d \dots (20)$$

Donde:

c: Es la separación entre el electrodo de corriente y su correspondiente de tensión.

d: Es la separación entre los electrodos de tensión.

R: Resistencia medida.

2.10.1.3 Método de medición de resistencia de una varilla.

También conocido como el Método de la Variación de Profundidad que consiste en medir la resistencia de puesta a tierra de un electrodo tipo varilla y, basados en la ecuación de resistencia a tierra de un electrodo vertical en un suelo homogéneo y los datos geométricos de la varilla, derivar la resistividad del suelo. Se asume como en los métodos anteriores, que el terreno es homogéneo.

$$\rho = \frac{2\pi LR}{\ln\left(\frac{4L}{a}\right) - 1} \dots (21)$$

Donde:

ρ : Resistividad del terreno

L: longitud del electrodo

a: radio del electrodo

R: valor de resistencia.

El procedimiento comúnmente aplicado es el de disponer una varilla metálica con marcaciones cada 20 o 30 cm, y cuya longitud debe ser la suficiente como para obtener la mayor información posible de la variaciones de la resistencia leída a medida que penetra la varilla en la tierra (lo que originó el nombre de Método de la Variación de Profundidad), es decir por cada marca se lee un valor de resistencia y con la fórmula anterior se calcula la resistividad.

Este método solo se debe aplicar cuando no se disponga del espacio suficiente para utilizar los métodos de Wenner o de Schlumberger-Palmer, pues la prospección es mucho menor, o en el caso de solo poder disponer de un medidor de resistencia de tierra o telurómetro de tres electrodos.

2.10.1.4 Medida de resistividad sobre pavimentos o concreto.

En ocasiones las mediciones de resistividad del suelo deben realizarse en suelos cubiertos por pavimentos, concreto o cemento y en los cuales se hace imposible enterrar los electrodos tipo varilla. En tales casos pueden usarse placas de cobre para reemplazar los electrodos auxiliares y agua para remojar el punto donde serán ubicadas.

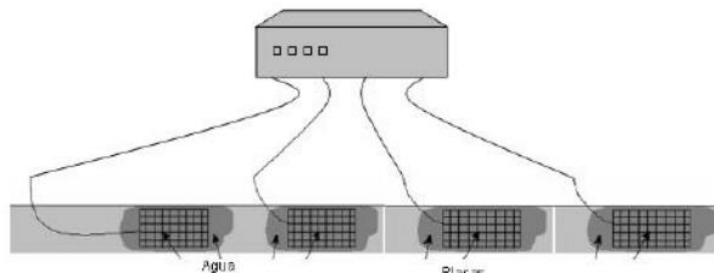


Figura 10. Medida de resistividad del terreno en concreto mediante placas de cobre.

Las placas de cobre deberán ser fijadas a la misma distancia en que se colocaran los electrodos auxiliares de acuerdo al método de Wenner. Las dimensiones de la placa deberán ser de 30x30 cm y espesor de 3.8cm. Se debe verter agua sobre las placas y remojar el sitio donde serán ubicadas, es necesario esperar un tiempo considerable para que el agua penetre y la lectura de la resistencia se haya estabilizado. El tiempo requerido para el proceso de penetración de la humedad varía dependiendo del espesor y de la permeabilidad de la capa del pavimento, por lo general con 30 minutos es suficiente.

Se debe tener cuidado de que las áreas humedecidas no se interconecten. Las placas realizaran la misma función de los electrodos auxiliares.

La metodología de la medición será la misma con la que se lleva a cabo la del método de Wenner junto a las fórmulas utilizadas en la misma.

2.11 Resistencia del sistema de tierra.

Un adecuado sistema de tierra proporciona una baja resistencia a fin de minimizar la elevación del potencial de tierra con respecto a un punto remoto. Para plantas, subestaciones de plantas y subestaciones de transmisión, la resistencia a tierra es cerca de 1Ω o menos. En subestaciones de distribución, el intervalo aceptable es de 1 hasta 5Ω , dependiendo de las condiciones del lugar.

En las estructuras de subtransmisión, los valores que se recomiendan en la práctica oscilan alrededor de 2Ω , permitiéndose en zonas de bajo nivel isocerámico hasta 30Ω .

Los valores recomendados por el STD IEEE 142-1991, "Grounding of Industrial and Commercial Power Systems", son los siguientes:

- Para grandes subestaciones, líneas de transmisión y estaciones de generación: 1 Ohm.
- Para subestaciones de plantas industriales, edificios y grandes instalaciones comerciales: 1-5 Ohm.
- Para un electrodo simple: 25 Ohm.

Ya estando en servicio, es necesario hacer pruebas periódicas para comprobar que el sistema de puesta a tierra sigue en condiciones óptimas de trabajo, y prestando seguridad a las personas y equipos. Después de la instalación de una estructura a puesta a tierra, el asentamiento de la tierra con los cambios climáticos cíclicos anuales tiende a reducir la impedancia de tierra durante el primer año o dos. Para grandes sistemas de puesta a tierra se ha determinado que hasta en un periodo de 18 años se presenta poca variación en el valor medido inicialmente de la resistencia. Puede ocurrir también, que la resistencia esté aumentando con el tiempo, para ello son necesarias acciones que tengan la finalidad de devolverle al sistema el valor óptimo para el que fue diseñado.

Estas acciones se consideran de acuerdo a la gravedad de la situación de daño y se pueden añadir electrodos a la instalación, sustituir conexiones que presenten corrosión, aumentar el contenido de humedad y/o el tratamiento químico del suelo. Los valores de resistencia bajos son requeridos para mantener a un nivel seguro los potenciales que se puedan dar en caso de falla en instalaciones eléctricas.

2.11.1 Métodos para la medición de la resistencia del sistema de tierra. Medición en estructuras de alto voltaje.

- Medición de la resistencia de la conexión a masa sin desenganchar el cable de masa superior aéreos usando el método de pinza selectiva.

La medición de la resistencia de tierra de una estructura de alto voltaje individual requiere que se desenganche (separe) el cable de masa aéreo o la separación del sistema de conexión a masa de la construcción de la estructura. En caso contrario podrían producirse lecturas

falsas de la resistencia del electrodo de masa de la estructura debido al circuito paralelo de las demás estructuras conectadas entre sí por un cable de masa aéreo.

El método de medición empleado con el fluke 1625 funciona con su transformador de corriente externo para medir el flujo de corriente verdadero a través del electrodo de masa, permite realizar mediciones de resistencia del electrodo de masa sin desconexión del sistema de conexión a masa o desenganchando el cable de masa aéreo.

Cuando están conectados los cuatro refuerzos de la estructura a la masa de los cimientos de dicha estructura, la corriente de mediciones I_{med} se divide en cinco componentes de acuerdo con las resistencias presentes implicadas.

Una parte fluye a través de la construcción de la estructura hasta el cable de masa aéreo y después hasta las resistencias de la conexión a masa de la estructura conectada al circuito.

Los otros cuatro componentes de la corriente ($I_1 \dots I_4$) fluyen a través de los pedestales de cada estructura.

La adición de todas las corrientes da como resultado una corriente I_E que pasa a través de la resistencia de la conexión a masa, es decir, la resistencia del electrodo de masa “compuesto” al terreno.

Si el transformador de corriente se sujeta a cada base de las estructuras, una después de la otra, deberán medirse cuatro resistencias que muestra un comportamiento inversamente proporcional a los componentes de la corriente correspondiente $I_1 \dots I_4$. El punto de alimentación de la corriente de medición se dejara sin cargar para evitar un cambio en la distribución actual.

En consecuencia, estas resistencias equivalentes se muestran como:

$$R_{Ei} = U_{med} / I_i \dots (22)$$

Así, la resistencia de la conexión a masa R de la estructura se determina como circuito paralelo de la resistencia individual equivalente:

$$R_E = \frac{1}{\frac{1}{R_{E1}} + \frac{1}{R_{E2}} + \frac{1}{R_{E3}} + \frac{1}{R_{E4}}} \dots (23)$$

La conexión de la estructura de la línea al fluke se realiza por medio de un anillo conectado a una de las patas de la estructura, a esta pata también se le pondrá un caimán, y se conectarán dos electrodos de masa por medio de una sonda. El primer electrodo de masa será enterrado a 20 metros de la estructura y el segundo electrodo de masa a 20 metros del primer electrodo.

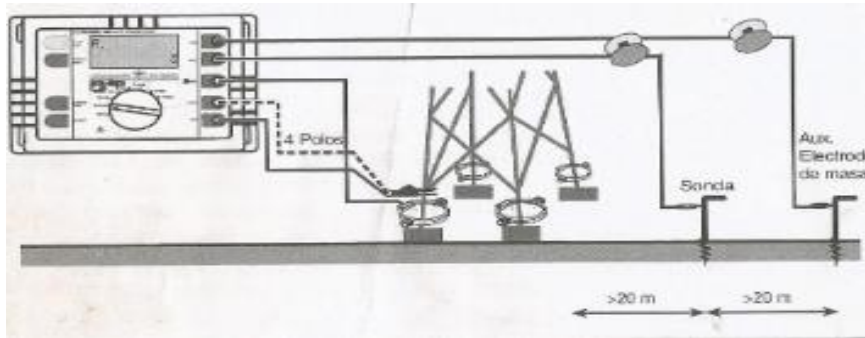


Figura 11. Representación de la medición de la resistencia de la conexión a masa sin desenganchar el cable de masa aéreo.

La metodología para la realización de la prueba es la siguiente:

1. girar el selector giratorio central hasta la posición “R_E 3pole”. Hay que considerar que cuando existe un destello de los símbolos de conexión es señal de una conexión incorrecta.
2. presionar el botón “START TEST” a continuación se realiza una secuencia de pruebas completamente automatizada de todos los parámetros relevantes, como el electrodo de masa auxiliar, o la resistencia de la sonda y el electrodo de masa, que acaba mostrando el resultado de R_E.
3. se presenta el valor en la pantalla de R_E.

Después de determinar los valores de R_{Ei} de todos los pedestales de estructura, debe calcularse la resistencia de tierra R_E real:

$$R_E = \frac{1}{\frac{1}{R_{E1}} + \frac{1}{R_{E2}} + \frac{1}{R_{E3}} + \frac{1}{R_{E4}}} \dots (23)$$

3. Desarrollo

En las oficinas de líneas de subtransmision de comisión federal de electricidad aparentemente todo funciona bien y se realizan de acuerdo a las normas establecidas o con cierta metodología para el buen funcionamiento de la operatividad de la empresa. Sin embargo existen puntos en los cuales se han descuidado ciertos aspectos que están ocasionando muchos problemas operativos.

El tema de sistemas de tierras es un tema de poco interés dentro del buen funcionamiento de las líneas, y por ellos les está pasando facturas elevadas de tiempo de trabajo del personal y de interrupciones tan constantes que son más del doble a las presentadas en años anteriores. Las oficinas de líneas de subtransmision es parte de la Zona de distribución sureste y en el estado de Chiapas es la encargada de todas las líneas de subtransmision que son el total 25 líneas a lo largo del estado. Teniendo bases operativas en puntos estratégicos como; Villaflores, Tuxtla Gutiérrez, Bochil, Cintalapa.

3.1 Historial de salidas en el sistema e identificación de fallas.

Cuando hay una interrupción en el sistema queda un registro del lugar aproximado de donde sucede para que las cuadrillas vayan a buscar la causa. Una de las causas más comunes son por aves que hacen sus nidos en los aisladores y el material del que lo hacen es una hierba altamente conductora y al entrar en contacto con la línea viva hace un corto y opera el sistema de falla para evitar que avance hacia los demás componentes y los dañe la corriente de falla. Otra falla es porque alguna rama toca la línea por los fuertes vientos e igualmente hace el corto y se provoca la falla. En ocasiones la rama queda encima de las líneas de forma permanente y requiere que el personal vaya a la zona afectada a quitarla ya que el circuito queda en falla franca, es decir, que la línea quedara fuera mientras no se quite la rama. Estos dos eventos son realmente frecuentes pero ocurren por descuido o mala planeación de las maniobras de mantenimiento del personal, ya que dentro del plan anual se deben realizar patrullajes de las líneas ya sea aéreas o en tierra, debajo de la misma para la localización de posibles amenazas para la línea y así programar una maniobra de mantenimiento. Por decirlo así, estas fallas son responsabilidad del personal a cargo del buen funcionamiento de la línea.

Sin embargo, existen otras fallas que no son imputables al mantenimiento de la línea. Ya que estas ocurren de manera imprevista y no se pueden controlar, como por ejemplo, cuando se forma un ciclón o una tormenta con vientos tan fuertes que hacen que literalmente las líneas se encimen y obviamente una falla, o en el peor escenario los postes o estructuras se debiliten y caigan las líneas o en algunos casos solo existe la ruptura de las líneas. En algunos casos son tan inusuales que se necesitan evidencias claras para que sean creíbles, así sucedió cuando un ave voló tan cerca de una línea que se presume que al abrir sus alas provoco un arco eléctrico que termino en una falla y en la muerte del pájaro. Al final se anexara tal evidencia.

Pero existe una falla que está dentro de un rango especial, ya que lo que lo provoca no se puede predecir con exactitud, pero el efecto que este conlleva se puede evitar para que no afecte en el funcionamiento, es decir, que no exista daño alguno, esta falla es por descarga atmosférica o ATM, y la forma en que se puede contrarrestar el daño es teniendo un buen sistema de tierra y tener un control de la resistividad del terreno donde se encuentran las estructuras.

En total de enero del 2011 a noviembre del 2016 han ocurrido 155 fallas registradas como salidas de línea en el Sistema Integral Administración Distribución (SIAD) de la División de Distribución Sureste de CFE, pero solo en 2016 se registraron un total de 43 salidas de línea, esto hasta el 9 de noviembre del 2016, que fue la última fecha de registro para fines de este reporte. De las cuales 81 tienen la clave *W-B03* que tiene registro de alto valor de resistencia a tierra, estas son casi la mitad de las fallas por mantenimiento de la línea ocurridas desde hace 6 años, y vienen derivadas por un mal sistema de tierras.

3.1.1 Localización de todas las fallas registradas del 2011 a noviembre del 2016.

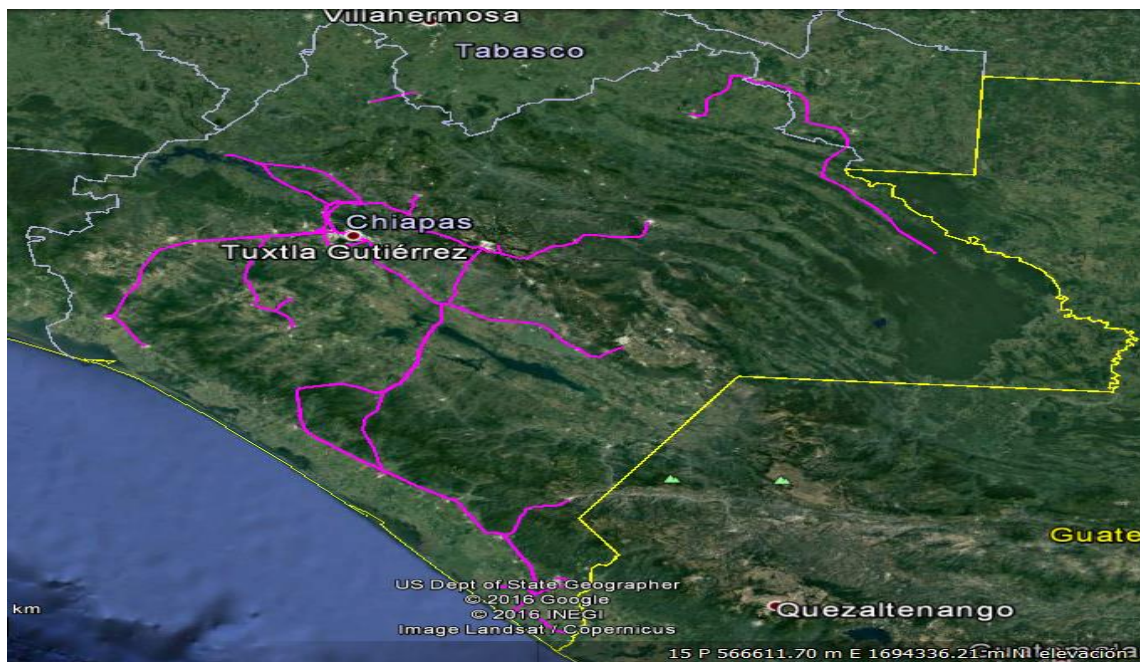


Figura 12. Localización de líneas de 115 kV en el estado de Chiapas.

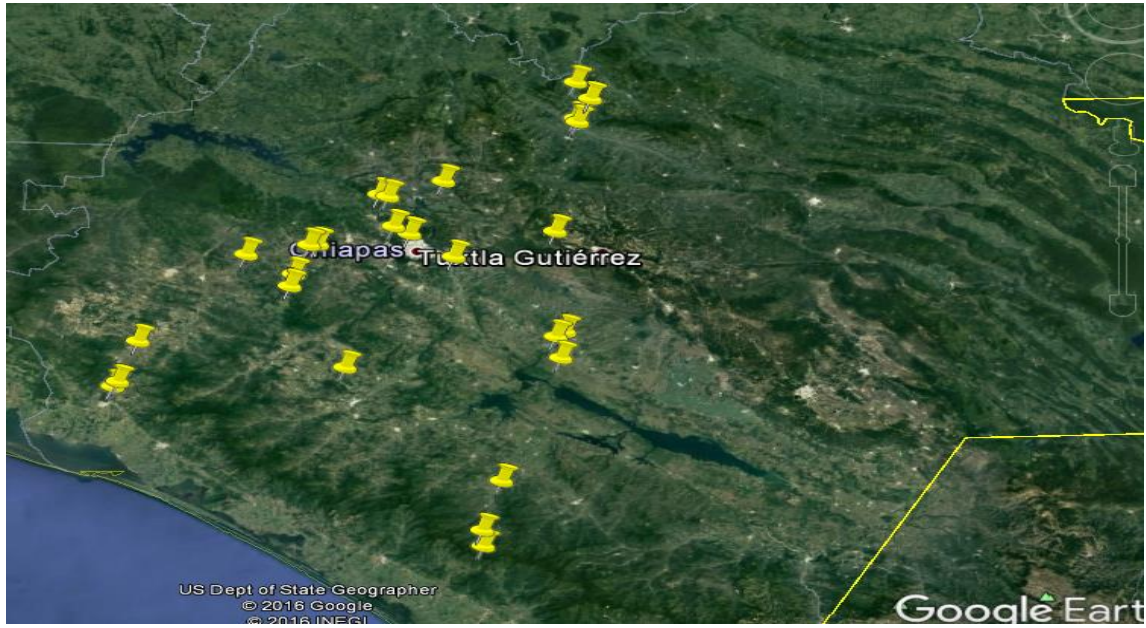


Figura 13. Fallas localizadas durante el 2011.



Figura 14. Fallas localizadas durante el 2012.



Figura 15. Fallas localizadas durante el 2013.

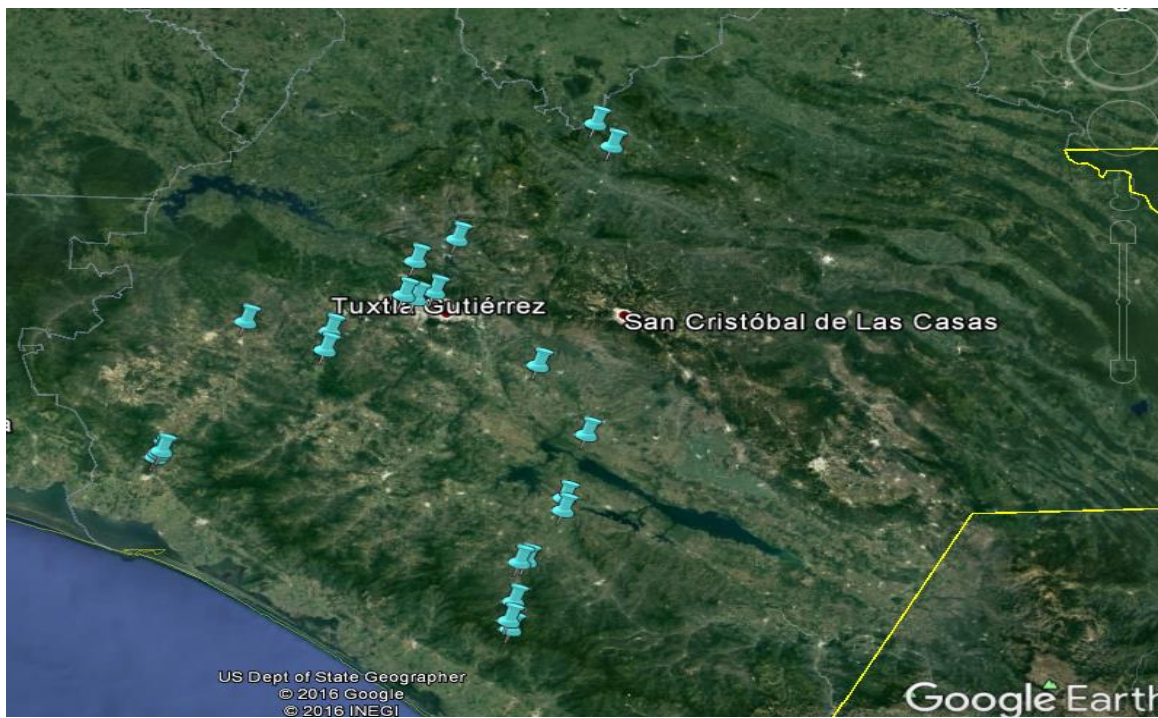


Figura 16. Fallas localizadas durante el 2014.



Figura 17. Fallas localizadas durante el 2015.



Figura 18. Fallas localizadas durante el 2016.

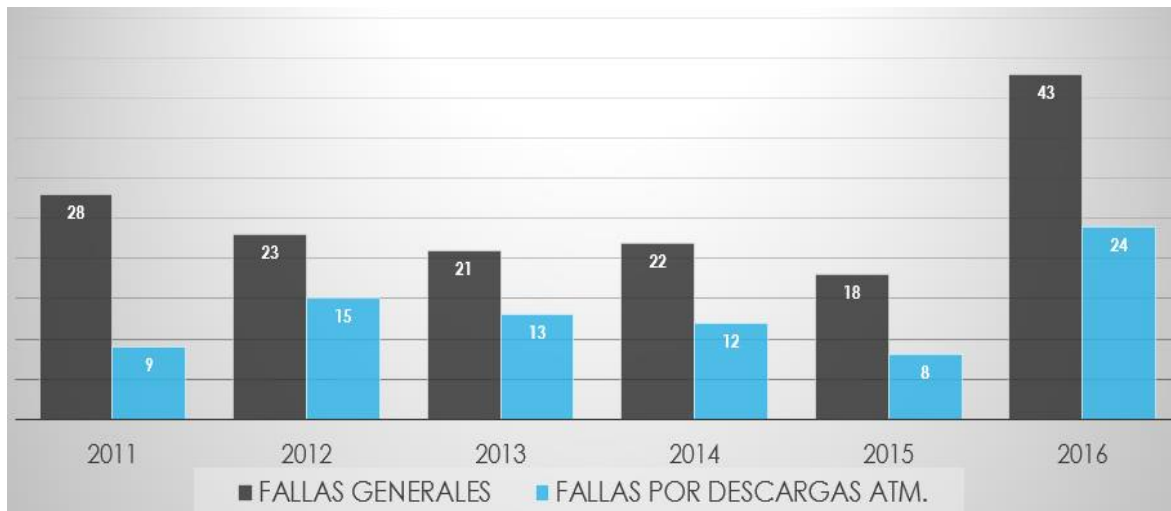


Figura 19. Registro del total de las fallas y su posible causa.

- El 52.25% del total de las fallas registradas en 6 años son por descargas atm y se asocian a un mal sistema de tierra o alta resistividad del terreno.

3.2 Medición del sistema de tierra en diferentes tipos de estructuras.

La línea donde base este proyecto es SAB-73750-TXN que tiene su inicio de la subestación conocida como el Sabino hasta la subestación donde se encuentran las oficinas de líneas de subtransmisión, que es la de Tuxtla norte, con un total de 70 estructuras a lo largo de 14,690.12 kms.

A lo largo de la trayectoria de la línea encontré dos tipos de terrenos, el primero es a partir de la subestación del Sabino en la estructura con clave número 1 hasta la estructura con clave número 41, posteriormente a partir de la estructura número 42 hasta la llegada a la subestación en la estructura 70 el tipo de terreno es plano, sobre el camellón de todo el libramiento norte.

El nivel ceraunico en el estado de Chiapas tiene diferentes valores de acuerdo a la latitud y a las diferentes zonas. En la línea SAB-73750-TXN es de 90 rayos/km²/año de acuerdo a su localización geográfica y los tipos de terreno en los que se encuentran las estructuras.

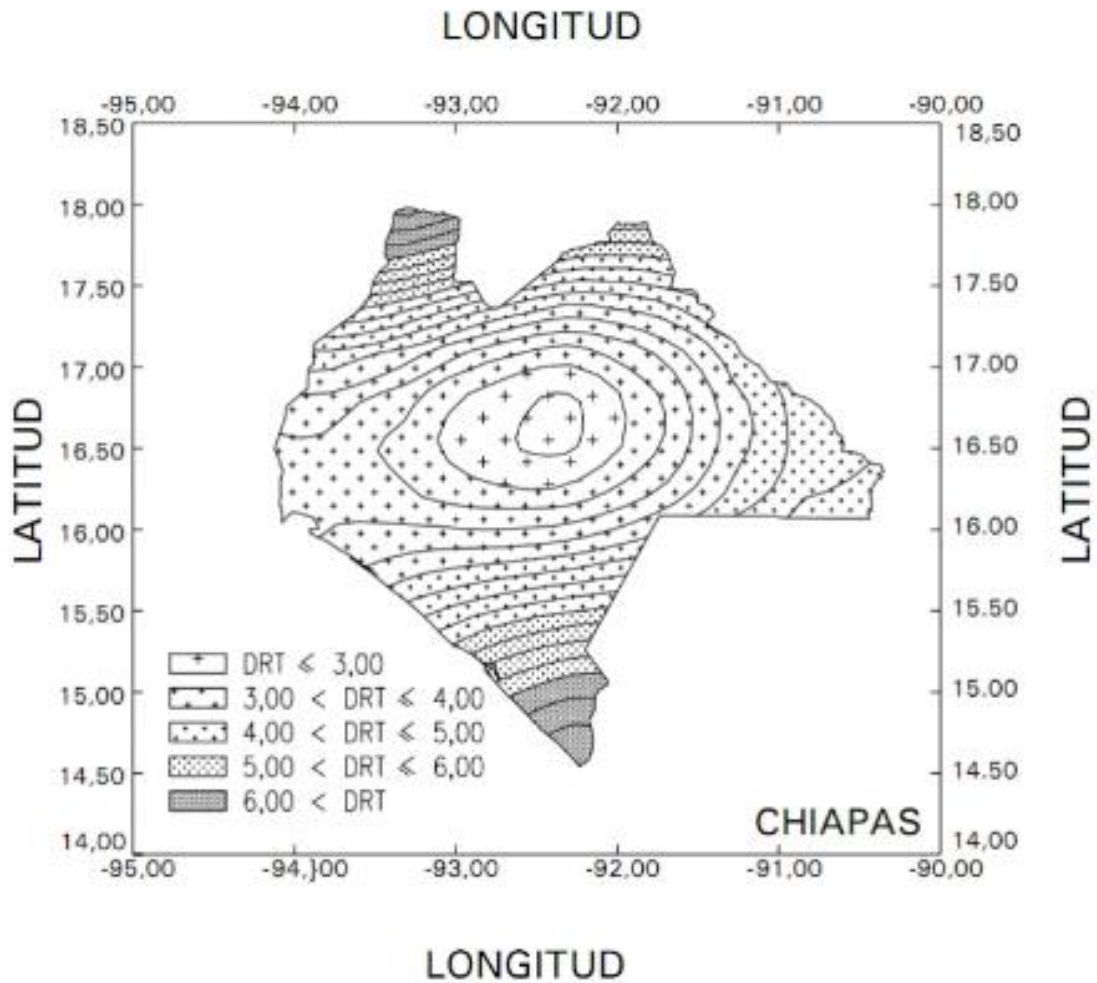


Figura 20. Mapa promedio anual de densidad de rayos a tierra en el estado de Chiapas.

Para poder elegir a las estructuras en donde se realizaron los estudios se tomaron en cuenta diferentes factores, tales como, fallas registradas cerca de ellas, si requiere cambio de aislamiento dañado o simplemente para darle mantenimiento a la línea, ya que es a veces casi inaccesible llegar al lugar en donde se localizan las demás estructuras.

Como se trataron solo de dos tipos de estructuras que son las estructuras autoportadas en las zonas montañosas y los troncocónicos en el área urbana, se eligieron 49 estructuras para realizar medición de resistencia del sistema de tierra.

3.2.1 Trayectoria y características de la línea sometida al estudio.

Todos los sistemas a estudiar tenían aisladores de disco de cristal con clave 10SV, con el conductor en posición vertical y con 9 aisladores. En algunas estructuras no era necesario instalar apartarrayos, sin embargo en algunas otras se vio a la necesidad de la instalación de uno, y el tipo de apartarrayo que instalan en las líneas de subtransmisión es el tipo alea, debido a su eficiencia. Todas las estructuras en donde se realizaron las mediciones tenían diferentes metros sobre el nivel del mar, tales que se pondrán en el tabulador de registro. El tipo de terreno es 37 estructuras en montaña y 12 en terreno plano.



Figura 21. Trayectoria de la línea SAB-73750-TXN

Las estructuras en terreno montañoso son de tipo autosoportadas ya que estas presentan mayor resistencia en tramos largos entre estructura y estructura. Para el paso de la línea en la ciudad se optó por las estructuras de tipo troncocónico ya que, aunque se tiene una distancia considerablemente menor entre estructura y estructura, su área de instalación es igualmente menor y se tiene mayor espacio para el paso de los coches y permitir mayor fluidez vehicular como el que se tiene en el libramiento norte.

3.2.2 Selección del equipo de medición a utilizar.

Al llegar a las oficinas de líneas de subtransmisión se puso a mi disposición todo el equipo de medición que ellos tenían a su cargo, todos de la marca FLUKE, entre ellos tome el fluke 1625, este es el Megger con la mayor precisión para poder medir resistividad del terreno y también con la función de poder medir la resistencia del sistema de tierra. Este equipo es muy robusto, ya que cuenta con muchos complementos, tales como estacas de metal, rollos de cable, un anillo de medición, un metro y el aparato, un aproximado de unos 30 kilos en total por todo el equipo.

Al ser la opción con mayor precisión, opte por utilizar ese para realizar mediciones de resistividad del terreno, sin embargo, estaba en existencia un amperímetro de gancho de la marca fluke 1630 que únicamente media la resistencia del sistema de tierra con una diferencia de medición entre él y el Megger de 0.5Ω o menos, pero con una diferencia muy importante en tamaño y peso, perfecto para mediciones dentro de la montaña en donde era casi imposible ir a pie con todo el equipo de medición cargando.

Por lo tanto, en las ocasiones en donde solo se requería realizar mediciones de resistencia del sistema de tierra o en donde el lugar que se encontraba la estructura fuese muy estrecho o de difícil acceso, utilice el amperímetro de gancho marca fluke 1630.

3.2.3 Realización de las mediciones resistencia del sistema.

Las mediciones que se hicieron fueron con dos aparatos, un Megger Fluke 1625 y un amperímetro de gancho Fluke 1630.

3.2.3.1 Mediciones con fluke 1625.



Figura 22. Fluke 1625

En la realización de las mediciones del sistema era prácticamente en un principio explicar el funcionamiento del Megger y todos los pasos a seguir para poder realizar las mediciones, ya que el personal no estaba familiarizado con el funcionamiento de este. Es importante que el personal se quede con este conocimiento porque es de vital importancia realizar mediciones constantes como programa de prevención de fallas.



Figura 23. Identificación del Megger.

Para poder tener mediciones fieles, además que de acuerdo a lo que dice la norma que una estructura debe estar completamente limpia debajo de ella y en su botón panel, las patas de las estructuras deben estar por completo libres de crecimiento de maleza o de cualquier otra planta.

Es por ello que la mitad del personal se dedicó a quitar la maleza de todas las estructuras para poder realizar las mediciones con una alta precisión y también por seguridad para evitar encontrar algún animal que nos pudiese poner en riesgo.



Figura 24. Limpieza del botón panel y patas de la estructura.

El primer paso fue poner las estacas, la primera a 20 metros de la estructura del sistema y la segunda a 20 metros de la primera. En ocasiones el terreno era demasiado pedregoso y las estacas no eran posibles su instalación a la profundidad requerida, así que enterraron por completo para realizar las mediciones.



Figura 25. Colocación de la primera y segunda estaca a 20 metros una de otra.

Realizamos la conexión del anillo de medición a la primer pata de la estructura para la primer medición de esta. Además del cable con punta de caimán puesto mordiendo una parte de la estructura metálica cerca del anillo de medición y del cable del sistema de tierra de la estructura, siguiendo el manual de operación del Megger.



Figura 26. Conexión del anillo de medición a la primer pata.

Teniendo todos los elementos externos instalados, las estacas en la tierra y el anillo de medición en la pata de la estructura además del cable con punta caimán en la estructura, posteriormente se hicieron las conexiones del Megger con cables conectados a los elementos externos a la estructura.



Figura 27. Conexión del Megger.

Teniendo todo conectado, se realiza la medición y el llenado del tabulador para después realizar el cálculo de la resistencia del sistema. Cabe mencionar que en cada pata a la que se le realizó la medición, se repitió 4 veces para poder aplicar la fórmula de Resistencia a tierra real y así tener una media promedio de las mediciones en caso de que exista una variación o que el sistema no sea estable. Cuando ya se tengan las 4 mediciones de la misma pata se promedian los resultados y ese es el valor de R_E en la primera pata.



Figura 28. Llenado del tabulador.



Figura 29. Reiniciar 4 veces la medición en la misma pata en cada una de ellas.



Figura 30. Repetir la secuencia en cada una de las patas.

3.2.3.2 Mediciones con fluke 1630.

Para lugares en donde no se puede llevar el fluke 1625 o cuando no se requiere la medición de la resistividad del terreno, utilice el fluke 1630. Las mediciones con este aparato son menos tediosas y se realizan con mayor rapidez.



Figura 31. Fluke 1630

Las mediciones constan de poner el selector giratorio en Ω que es la unidad que queremos medir, abrimos el gancho y enganchamos el cable de puesta a tierra que está unida con la pata de la estructura. De la misma forma en que se realizar con el fluke 1625, se mide 4 veces en la misma pata para poder tener una diferencia en caso de que exista, para después sacar el promedio.

Al terminar las mediciones en todas las patas, los resultados de R_E se les aplican la fórmula para saber el valor de la resistencia de tierra R_E real. Los resultados se muestran en el punto 4.1.2.

3.3 Posibles causas del incremento en disparos y propuesta de mejora.

De acuerdo a las estadísticas presentadas en este proyecto, que fueron recabados del sistema de fallas y disparos de CFE, la causa que más alerta es la de disparos por descargas atm, ya que es algo que se puede evitar teniendo un buen monitoreo de las estructuras que son más propensas a descargas debido a su ubicación geográfica o al tipo de suelo en donde están construidas.

Debido a esto es indispensable planear correctamente el manteniendo de toda la línea y no solo de la línea en que se dedicó este estudio, si no que en todas las demás líneas de subtransmision que están a cargo en la zona. Con una buena planeación será posible la identificación de diferentes alertas que están a la vista de las cuadrillas para evitar que se disparen las líneas bajo ese concepto.

Además de la planeación, también es de gran importancia la capacitación de todo el personal, para que cualquiera de ellos pueda realizar mediciones en cada estructura a la que ellos van a realizar sus trabajos diarios, ya sea de mantenimiento de la línea, patrullaje de la línea o cuando se realizan correcciones o cambios de alguno de los componentes de la estructura por alguna situación de falla, aunque la falla registrada no sea por descargas atm, pero como se mencionó, hay estructuras en donde su acceso es bastante difícil y únicamente se puede llegar por aire.

Las situaciones que se pueden localizar a simple vista para poder evitar una futura falla son los presentados:

Cuando se encuentran aisladores contaminados, ya sea por la humedad y el tiempo o por excremento de aves. Esto contrarresta al correcto funcionamiento cuando existe una descarga en la línea o cerca de ella.

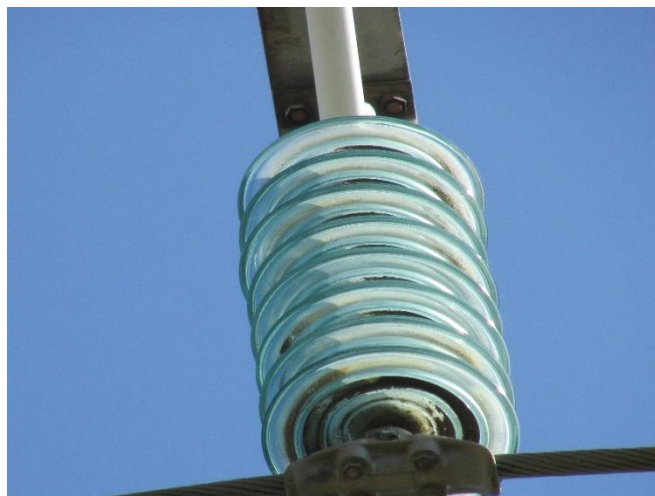


Figura 32. Aislador tipo 10SV contaminado.

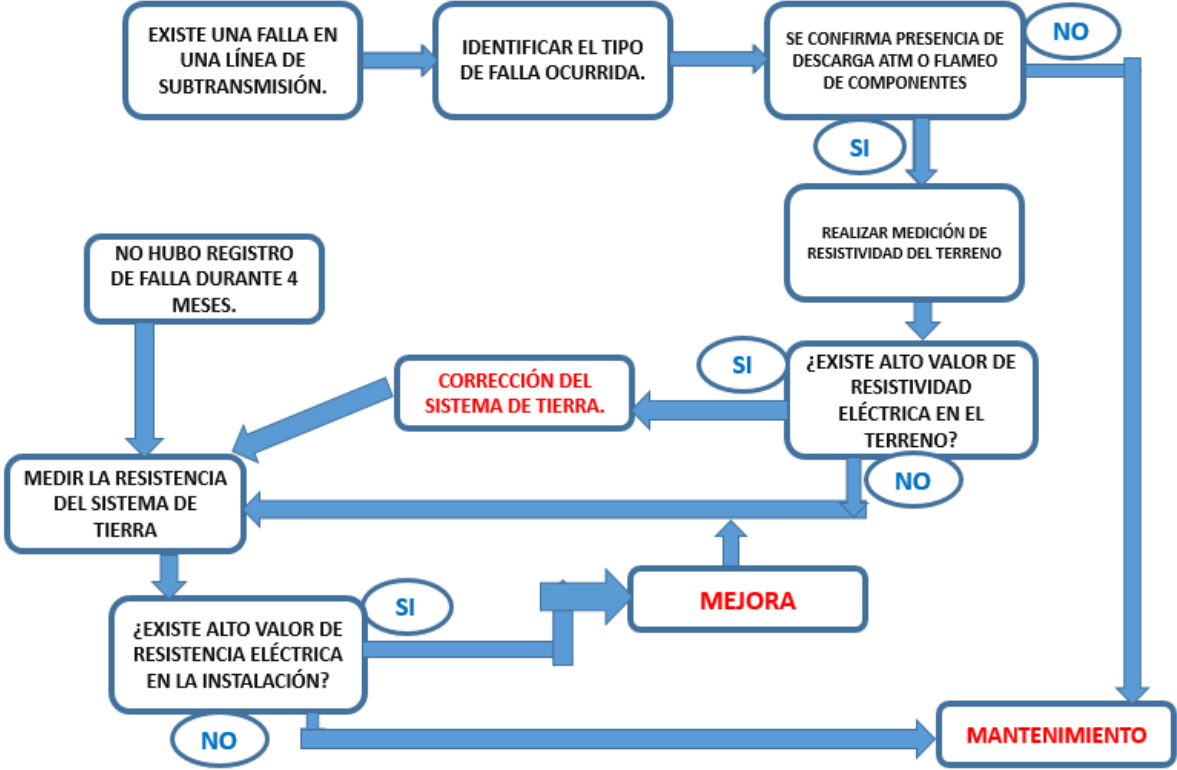
En ocasiones el aislador opera bajo una situación de descarga y a su paso deja un rastro de flama, en estos casos se debe realizar un cambio de aislador dañado. A diferencia del aislador tipo 10SV, los apartarrayos tipo alea por el tipo de material con el que está hecho, la contaminación del exterior no le afecta, pero al igual que los aisladores, cuando una corriente de rayo pasa por él, deja un rastro de flama.



Figura 33. Apartarrayo tipo protecto-line flameado.

Ante la busca de un mejor funcionamiento del sistema de subtransmision de energía, se propone una guía, con el método explicado anteriormente, para que el personal de líneas de subtransmision para que sepa el momento adecuado en el cual debe realizar mejoras, correcciones o solo mantenimiento del sistema de tierra o de la resistividad del terreno.

3.4 Metodología para diagnóstico de tipo de mantenimiento de sistemas de puesta a tierra en las lst.



4. Resultados

4.1 Resultados.

Los valores obtenidos de las mediciones están en 3 partes, las mediciones en promedio por pata, el resultado aplicando la formula en solo algunas mediciones y el tabulador final con todos los valores obtenidos.

4.1.1 Mediciones en tabulador.

Algunas mediciones realizadas, con diferentes tipos de terrenos.

Medición del sistema de tierra de la L. S. T SAB-TXN CIRCUITO 73750 en el año de 2016

N° TORRE	FECHA	CUADRILLA	TIPO DE TERRENO	N° PATA	MEDICIONES (Ω)				PROMEDIO POR C/PATA
					1	2	3	4	
1	20/SEP/2016	XM 171	Montañoso con terreno sin rocas.	1	41.8	35.2	32.5	31.1	35.1
				2	19.2	16.5	16.7	16.8	17.3
				3	6.4	5.3	4.7	4.7	5.3
				4	4.4	4.4	4.5	4.6	4.5
13	30/SEP/2016	XM 603	Montañoso con terreno rocoso.	1	540.5	367.2	402.7	434.4	436.2
				2	246.3	225.2	239.7	245.3	239.1
				3	0.17	0.12	0.21	0.17	0.16
				4	1.4	1.5	1.4	1.4	1.4

14	30/SEP/2016	XM171	Montañoso con terreno rocoso.	1	0.5	0.7	0.6	0.5	0.6
				2	813	803.4	820.3	810.8	811.8
				3	186.2	188.2	187.3	186.5	187
				4	0.14	0.17	0.15	0.18	0.16
22	15/OCT/2016	XM 68	Montañoso con terreno rocoso.	1	11.2	10.4	11.1	10.9	10.9
				2	7.5	7.9	8.0	7.4	7.7
				3	10.1	9.4	9.7	9.4	9.6
				4	12.3	12.2	12.2	12.3	12.25
38	21/OCT/2016	XM171	Montañoso con terreno rocoso.	1	694.4	694.3	693	694.2	693.9
				2	178.2	178.5	180.3	179.8	179.2
				3	228.8	228.5	223.5	227.9	227.1
				4	215.9	215.3	213.5	220.4	216.2
41	25/OCT/2016	XM 603	Montañoso con terreno rocoso.	1	0.43	.5	6.7	7.4	3.6
				2	9.7	9.8	9.7	9.7	9.7
				3	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8
				4	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8
57	2/NOV/2016	XM171	plano	1	10.3	10.4	10.3	10.4	10.4
				2	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3

				3	10.4	10.4	10.3	10.3	10.4
				4	12.2	12.2	12.4	12.5	12.4
68	8/NOV/2016	XM603	Plano	1	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9
				2	6	5.9	6.1	6.0	6.0
				3	8.3	8.0	8.1	8.5	8.3
				4	8.4	8.2	8.2	8.4	8.3

4.1.2 Resultados mediante formula.

Por medio de las fórmulas para tener el valor de la resistencia total de tierra real se sustituyen los valores obtenidos:

$$R_E = \frac{1}{\frac{1}{R_{E1}} + \frac{1}{R_{E2}} + \frac{1}{R_{E3}} + \frac{1}{R_{E4}}}$$

RESULTADO ESTRUCTURA 1

$$R_E = \frac{1}{\frac{1}{35.1} + \frac{1}{17.3} + \frac{1}{5.3} + \frac{1}{4.5}} = 2.1 \Omega$$

RESULTADO ESTRUCTURA 13

$$R_E = \frac{1}{\frac{1}{436.2} + \frac{1}{239.1} + \frac{1}{0.16} + \frac{1}{1.4}} = 0.14 \Omega$$

RESULTADO ESTRUCTURA 14

$$R_E = \frac{1}{\frac{1}{0.6} + \frac{1}{811.6} + \frac{1}{187} + \frac{1}{0.16}} = 0.12 \Omega$$

RESULTADO ESTRUCTURA 22

$$R_E = \frac{1}{\frac{1}{10.9} + \frac{1}{7.7} + \frac{1}{9.6} + \frac{1}{12.2}} = 2.43 \Omega$$

RESULTADO ESTRUCTURA 38

$$R_E = \frac{1}{\frac{1}{693.9} + \frac{1}{179.2} + \frac{1}{227.1} + \frac{1}{216.2}} = 62.3 \Omega$$

RESULTADO ESTRUCTURA 41

$$R_E = \frac{1}{\frac{1}{3.6} + \frac{1}{9.7} + \frac{1}{7.8} + \frac{1}{6.8}} = 1.58 \Omega$$

RESULTADO ESTRUCTURA 57

$$R_E = \frac{1}{\frac{1}{10.4} + \frac{1}{7.3} + \frac{1}{10.4} + \frac{1}{12.4}} = 2.5 \Omega$$

RESULTADO ESTRUCTURA 68

$$R_E = \frac{1}{\frac{1}{6.9} + \frac{1}{6.0} + \frac{1}{8.3} + \frac{1}{8.3}} = 1.88 \Omega$$

4.1.3 Resultados de todas las mediciones realizadas.

**COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD
DIVISIÓN SURESTE
SUBGERENCIA DE DISTRIBUCIÓN**

*DEPARTAMENTO DE LÍNEAS DE SUBTRANSMISION
PERFIL DEL TERRENO Y RESISTENCIA A TIERRA DE ESTRUCTURAS
LÍNEA 73750 (SAB-TXN)*

Referencias:

- | | | | |
|--|---|------------------------------------|---------------------------|
| 1.- Número de estructura. | 5.- De estructura a estructura. | 9.- Tipo de aislador. | 13.- Nivel ceraunico. |
| 2.- Tipo de estructura. | 6.- Metros. | 10.- Numero de aisladores. | 14.- Clave de la línea. |
| 3.- Metros sobre el nivel del mar. | 7.- Kilómetros acumulados en total de la línea. | 11.- Tipo de terreno. | 15.- Clave de estructura. |
| 4.- Medición de la resistencia (Ω). | 8.- disposición del conductor. | 12.- Velocidad del viento (aprox). | |

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	TA	450	2.10	0-1	120.00	120.00	VERTICAL	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	1 TA
2	TA	500	2.10	1-2	207.00	327.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	2 TA
3	TA	550	8.30	2-3	250.00	577.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	3 TA
4	TA	600	9.10	3-4	250.00	827.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	4 TA
5	TA	650	3.70	4-5	274.00	1,101.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	5 TA

6	TA	700	2.40	5-6	250.00	1,351.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	6 TA
7	TA	750	7.80	6-7	238.00	1,589.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	7 TA
8	TA	800	8.60	7-8	246.00	1,835.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	8 TA
9	TA	850	2.50	8-9	257.00	2,092.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	9 TA
10	TA	900	15.50	9-10	227.00	2,319.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	10 TA
11	TA	950	2.20	10-11	227.00	2,546.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	11 TA
12	TA	1000	2.30	11-12	213.00	2,759.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	12 TA
13	TA	1050	0.14	12-13	300.00	3,059.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	13 TA
14	TA	1100	0.12	13-14	269.00	3,328.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	14 TA
15	TA	1150	2.20	14-15	265.00	3,593.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	15 TA
16	TA	1200	2.90	15-16	325.00	3,918.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	16 TA
17	TA	1300	1.70	16-17	325.00	4,243.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	17 TA
18	TA	1400	2.30	17-18	337.00	4,580.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	18 TA
19	TA	1500	3.20	18-19	294.00	4,874.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	19 TA
20	TA	1460	1.80	19-20	272.00	5,146.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	20 TA
21	TA	1420	1.40	20-21	202.00	5,348.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	21 TA
22	TA	1380	2.43	21-22	290.00	5,638.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	22 TA
23	TA	1340	5.10	22-23	285.00	5,923.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	23 TA
24	TA	1300	2.00	23-24	250.00	6,173.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	24 TA
25	TA	1220	1.80	24-25	252.00	6,425.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	25 TA
26	TA	1200	1.70	25-26	242.00	6,667.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	26 TA
27	TA	1240	2.70	26-27	256.00	6,923.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	27 TA
28	TA	1100	11.70	27-28	298.00	7,221.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	28 TA
29	TA	1150	36.80	28-29	257.00	7,478.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	29 TA
30	TA	1000	1.51	29-30	257.00	7,735.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	30 TA
31	TA	950	2.20	30-31	300.00	8,035.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	31 TA
32	TA	900	1.60	31-32	240.00	8,275.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	32 TA
33	TA	850	8.40	32-33	227.00	8,502.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	33 TA
34	TA	800	6.20	33-34	258.00	8,760.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	34 TA
35	TA	750	3.80	34-35	282.00	9,042.00	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	35 TA
36	TA	700	7.40	35-36	284.64	9,326.64	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	36 TA
37	TA	650	5.20	36-37	245.00	9,571.64	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	37 TA
38	TA	600	62.3	37-38	289.00	9,860.64	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	38 TA
39	TA	550	N/A	38-39	295.00	10,155.64	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	39 TA
40	TA	500	N/A	39-40	225.00	10,380.64	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	40 TA

41	TA	480	1.58	40-41	315.00	10,695.64	V	10SV	9	MONTAÑOSO	40	90	73750	41 TA
42	TA	480	N/A	41-42	245.00	10,940.64	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	42 TA
43	TA	480	N/A	42-43	348.00	11,288.64	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	43 TA
44	TA	480	N/A	43-44	333.00	11,621.64	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	44 TA
45	TA	480	N/A	44-45	307.48	11,929.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	45 TA
46	TA	480	N/A	45-46	251.00	12,180.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	46 TA
47	TA	480	N/A	46-47	110.00	12,290.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	47 TA
48	TA	480	N/A	47-48	110.00	12,400.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	48 TA
49	TA	480	N/A	48-49	110.00	12,510.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	49 TA
50	TCS	480	N/A	49-50	110.00	12,620.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	50 TA
51	TCS	480	N/A	50-51	110.00	12,730.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	51 TA
52	TCS	480	N/A	51-52	110.00	12,840.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	52 TA
53	TCS	480	N/A	52-53	110.00	12,950.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	53 TA
54	TCS	480	N/A	53-54	110.00	13,060.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	54 TA
55	TCS	480	N/A	54-55	110.00	13,170.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	55 TA
56	TCS	480	N/A	55-56	110.00	13,280.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	56 TA
57	TCS	480	2.56	56-57	110.00	13,390.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	57 TA
58	TCS	480	1.81	57-58	110.00	13,500.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	58 TA
59	TCS	480	2.38	58-59	110.00	13,610.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	59 TA
60	TCS	480	4.22	59-60	110.00	13,720.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	60 TA
61	TCS	480	3.86	60-61	110.00	13,830.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	61 TA
62	TCS	480	2.46	61-62	110.00	13,940.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	62 TA
63	TCS	480	8.03	62-63	110.00	14,050.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	63 TA
64	TCS	480	9.93	63-64	110.00	14,160.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	64 TA
65	TCS	480	10.24	64-65	110.00	14,270.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	65 TA
66	TCS	480	8.61	65-66	110.00	14,380.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	66 TA
67	TCS	480	3.92	66-67	110.00	14,490.12	V	10SV	9	PLANO	40	90	73750	67 TA
68	TCS	480	1.88	67-68	110.00	14,600.12	HORIZONTAL	10SV	9	PLANO	40	90	73750	68 TA
69	TCS	480	N/A	68-69	50.00	14,650.12	H	10SV	9	PLANO	40	90	73750	69 TA
70	TCS	480	N/A	69-70	40.00	14,690.12	H	10SV	9	PLANO	40	90	73750	70TA

5. Conclusiones

5.1 Conclusiones generales.

En las oficinas de líneas de subtransmisión se contaba con una metodología empírica para la mejora de sistemas de resistencia a tierra y prácticamente eran nulas las veces en que se midió la resistividad de la tierra en la que se encuentran las estructuras, pasándose totalmente por alto que por el paso del tiempo la tierra pierde sus características resistivas y esa por ese descuido era un hecho que cuando existían tormentas eléctricas y una descarga inducía la línea se producía un disparo y la interrupción del sistema.

Es importante mencionar que en las mediciones recopiladas, en algunas estructuras las mediciones, en promedio dan por debajo de lo requerido en la norma en las estructuras de líneas de subtransmisión, sin embargo en las mediciones individuales de cada pata de las estructuras, los resultados son altísimos, en algunos casos son extremos de hasta más de 800 Ω , por ello el resultado de la fórmula es muy engañoso y se debe tener en cuenta cada una de las mediciones realizadas para poder determinar si el sistema de tierra de cada estructura es la adecuada en caso de falla.

Aunque en el resultado final en ohms sea menor a la norma, en el momento de ir realizando las mediciones es importante llenar la bitácora mostrada en el anexo C para tener un control del sistema en cada una de las patas de las estructuras y así saber cuál es la que necesita que se mejore.

Ante la búsqueda de hacer las cosas como se deben, para poder descartar los disparos por descargas atm fue necesario regresar a algo tan olvidado y que levanta poco interés como el sistema de tierra dentro de la rama de la eléctrica, pero con una importancia tan grande como los demás procesos que se llevan a cabo en la transmisión de la energía, y ponerla en el plano que se debe. Con ello se propuso una mejora constante en la capacitación del personal de mantenimiento porque ellos son los encargados de prever cualquier situación que pueda ocurrir en las líneas, ellos pasan sus horas de trabajo en ellas y deben saber reconocer una posible amenaza con solo verla. Además de darles las herramientas para poder realizar cálculos y saber la cantidad exacta y método más adecuado que requiere la línea para que esta no falle y así aumentar la eficiencia de su trabajo y la calidad de servicio prestada por la empresa CFE.

5.2 Experiencia adquirida.

En el proceso de residencia profesional tuve la oportunidad de pertenecer a la empresa comisión federal de electricidad que tiene gran relevancia en el país. Aprendí acerca de los procesos llevados a cabo dentro de las líneas de subtransmisión y de la importancia que tiene

el compromiso, dedicación y eficiencia empleada para hacer las cosas en equipo y que así todo funcione correctamente con un mínimo margen de error.

Tuve la oportunidad de aprender de los conocimientos de los compañeros trabajadores de la empresa, compartiendo experiencias y nuevas ideas para emplear a un futuro no muy lejos para la mejora constante de los procesos llevados a cabo día con día en el campo laboral. Aprendí a convivir en un ambiente de trabajo y compartiendo mis conocimientos adquiridos durante mi carrera. El proceso de mi residencia profesional me ayudo a iniciar como profesionista y gracias a los consejos del personal de líneas a ser un profesional y crecer como ser humano.

Siempre estaré agradecido por la oportunidad que se me otorgo y las facilidades que se me prestaron para poder realizar mi proyecto, ya que estuvo a mi servicio el personal y todo el equipo de herramientas que yo siempre necesite. Fue una ayuda mutua entre la empresa y para mí porque además que este proyecto me ayudara a concluir mi carrera profesional y así obtener mi certificado me enseñó a como es la vida en el trabajo diario, y son experiencias que no son fáciles de conseguir.

6. Referencias Bibliográficas

Ingeniería de puesta a tierra autor: Manuel de la vega ortega editorial: limusa, S. A. de C.V. grupo noriega editores, colección de textos politécnicos serie electrotecnia. 1998. primera edición.

Red de puesta a tierra para estructuras de líneas de transmisión aéreas de 69 kv a 400 kv en operación, especificación cfe 00jl0-28. CFE. Agosto 2008.pp. 2-4.

Alta tensión y sistemas de transmisión autor: Luis a. siegert c. editorial: limusa, s.a de c.v grupo noriega editores, primera edición: 1998.

Fluke earth ground clamp 1630. Febrero 2006.

Fluke earth ground clamp 1625. Febrero 2006.

CFE Lampem electrodos de puesta a tierra.

NMX-J-549-ANCE-2005 sistema de protección contra tormentas eléctricas.

Especificaciones, materiales y métodos de medición.

y. h. chung, h. j. kim, g. h. kwon, t. b. park, s. h. kim, k. s. kim and j. w. choe, “neural network controlled voltage disturbance detector and output voltage regulator for dynamic voltage restorer”, power electronics and applications, pp. 1 -9, 2-5 sept. 2007.

Som 3533 capitulo 2 definiciones. Coordinación de distribución cfe. Pp.1-3-4-5-6-8. 2007.

Som 3533 Capítulo 4 tipos de estructuras coordinación de distribución cfe. 2007.

Som 3533 capitulo 6 sistemas de tierras en líneas de alta tensión cfe. Pp. 1-2. 2007.

Walter Esaú Pérez Loarca. Manual de aplicación de la norma IEEE std 81 para líneas y subestaciones eléctricas de transmisión. Ciudad universitaria, San Salvador, noviembre 2015.

Comisión Federal de Electricidad
Subdirección de construcción coordinación de proyectos de transmisión y transformación.

Instituto de Investigaciones Eléctricas
División sistemas eléctricos depto. Transmisión y distribución.

elektroshagg.com/articulos/nivelisoceraunicodemexico.html

ANEXOS

Anexo A.- Especificación CFE 00JL0-28

Bajante.

Es un conductor metálico que conecta al hilo de guarda con la red de puesta a tierra.

Cola de Rata.

Conductor de unión entre el hilo de guarda y la estructura.

Contra-Antena (Electrodo de Puesta a Tierra Horizontal).

Conductor metálico desnudo, enterrado y tendido en forma horizontal, con una profundidad y longitud variable, que debe estar conectado a la estructura, y sirve para drenar corrientes de descarga atmosférica o de falla.

Corriente de Descarga Atmosférica.

Es la corriente provocada por un rayo que incide en la línea de transmisión aérea y que fluye por el sistema de puesta a tierra.

Corriente de Falla.

Es la corriente alterna que fluye durante una falla de corto circuito de los conductores de la línea de transmisión aérea a tierra.

Electrodo de Puesta a Tierra.

Cuerpo conductor o conjunto de elementos conductores agrupados y en contacto directo con el suelo y destinados a establecer una conexión con el mismo.

Electrodo de Puesta a Tierra Vertical.

Conductor metálico desnudo enterrado en forma vertical, con una profundidad y longitud variable y sirve para drenar corrientes de descarga atmosférica o de falla.

Estructura de una Línea de Transmisión.

La unidad principal soporte, generalmente un poste, estructura o marco que soporta los aisladores, conductores y accesorios de una línea de transmisión aérea.

Puesta a Tierra.

Conectar intencionalmente estructuras y/o equipos al sistema de puesta a tierra.

Red de Puesta a Tierra.

Conjunto de electrodos de puesta a tierra, verticales y horizontales enterrados que drena a tierra las corrientes de descarga atmosférica y de falla, y es un punto de conexión seguro de puesta a tierra para el personal durante maniobras con líneas de transmisión aéreas energizadas o desenergizadas.

Relleno.

Aportación de un material diferente al suelo natural del sitio en contacto directo con los electrodos de puesta a tierra y el suelo circundante. Este relleno puede ser orgánico o químico (intensificador) cuya función es disminuir la resistividad alrededor de los electrodos para lograr una resistencia baja de puesta a tierra.

Resistencia de Puesta a Tierra.

Es la oposición al paso de la corriente eléctrica entre la red de puesta a tierra y un punto remoto, medida en Ω .

Resistividad Aparente (ρ_a).

Es la que se obtiene en el trabajo de campo, de acuerdo a un método de medición de resistividad "Wenner" para cada intervalo de medición.

Conectores de la Red de Puesta a Tierra.

Elementos utilizados para unir dos partes metálicas en forma soldable de la red de puesta a tierra, de tal manera que se garantice el contacto permanente entre ellas.

Apartarrayo.

Dispositivo o equipo que sirve de protección a las sobretensiones ocasionadas por la incidencia de descargas atmosféricas o por maniobras en el Sistema Eléctrico.

Aislamiento.

Elemento no conductor que se interpone para evitar el flujo de la corriente eléctrica de un punto a otro elemento o medio que separa 2 o más cosas.

Corriente de Falla.

Es la corriente alterna que fluye durante una falla de corto circuito de los conductores de la Línea de Alta Tensión aérea a tierra.

Claro.

Es la parte de una Línea de Alta Tensión comprendida entre dos estructuras consecutivas.

Corrosión.

Es el deterioro de un material (generalmente un metal) o de sus propiedades debido a la interacción con su ambiente.

Cátodo General.

Todas las estructuras metálicas instaladas en las Líneas de Alta Tensión de energía eléctrica.

Derecho de Vía.

Es la franja de terreno que sirve como zona de protección en la que se alojan las Líneas de Alta Tensión o ductos subterráneos, cuyo ancho depende de la tensión de las líneas y del diámetro de los ductos y que tiene por objeto brindar la mayor seguridad para su operación y mantenimiento para evitar daños tanto a las instalaciones como a terceros.

Descargas atmosféricas.

Puede incidir directamente, generando una sobretensión en la Línea de Alta Tensión. Pero también puede incidir cerca de la Línea de Alta Tensión (sobretensión inducida).

Falla.

Es una alteración o daño permanente o temporal de un elemento o equipo, que varía sus condiciones normales de operación y que generalmente causa un disturbio.

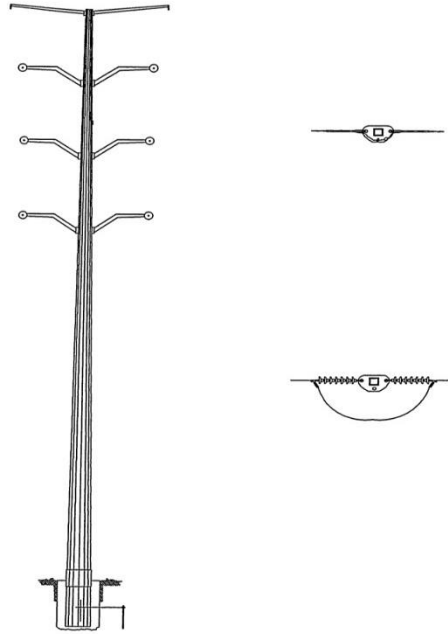
Nivel Cerámico.

Número de días con tormentas eléctricas registradas en un año.

Anexo B.- Tipos de estructuras.**ESTRUCTURAS DE POSTES TRONCOPIRAMIDALES AUTOSOPORTADOS TIPO CAMELLÓN**

El uso de estas estructuras se recomienda en zonas urbanas o suburbanas, en donde el uso del suelo se ve restringido dentro de vialidades o amplias avenidas, con estas estructuras reducen la amplitud del derecho de vía y favorece el impacto visual en Líneas de Alta Tensión.

POSTE MPT2D-30° (TCS)

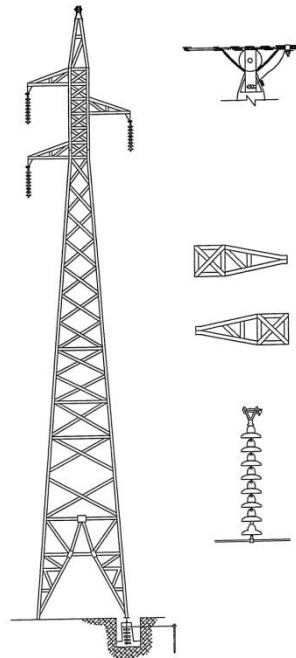


ESTRUCTURAS TIPO CON TORRES AUTOSOPORTADAS.

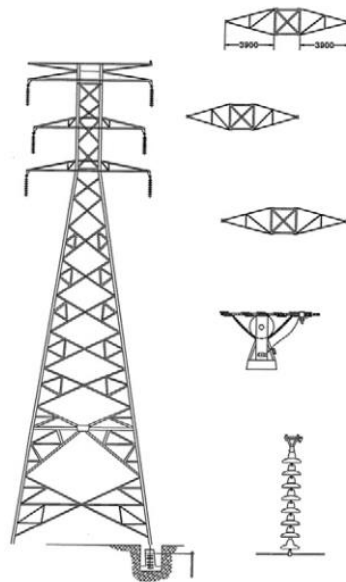
DISEÑOS ANTERIORES

Dado que el diseño de estas estructuras es para una velocidad normal de viento menor a 120 km/h, su uso es recomendado para zonas que no tienen influencias de vientos fuertes.

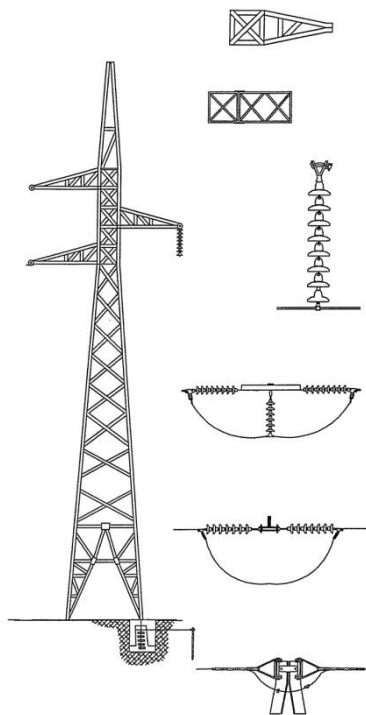
ESTRUCTURA TAS 0° DE SUSPENSIÓN. (ESTRUCTURA AUTO SOPORTADA DE SUSPENSIÓN).



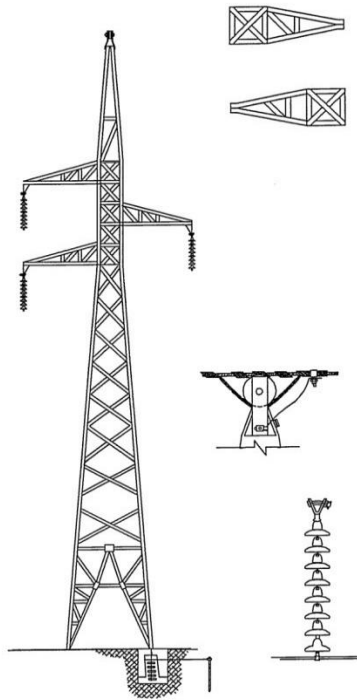
ESTRUCTURA TAS G2P SUSPENSIÓN GRANDES CLAROS. (ESTRUCTURA AUTO SOPORTADA DE SUSPENSIÓN).



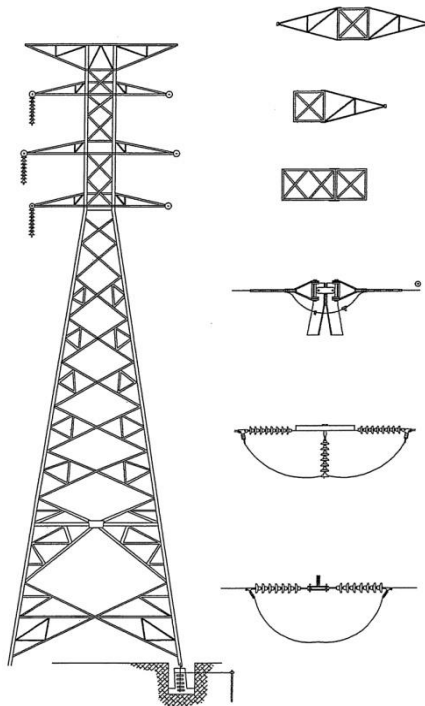
ESTRUCTURA TAR30° DE REMATE. (ESTRUCTURA AUTO SOPORTADA DE REMATE).



ESTRUCTURA TAS GP SUSPENSIÓN CLAROS LARGOS. (ESTRUCTURA AUTO SOPORTADA DE SUSPENSIÓN).



ESTRUCTURA TAR 2P 30° (ESTRUCTURA AUTO SOPORTADA DE REMATE)



ESTRUCTURA TA. (TIPO CON TORRES AUTOSOPORTADAS). NUEVO DISEÑO.

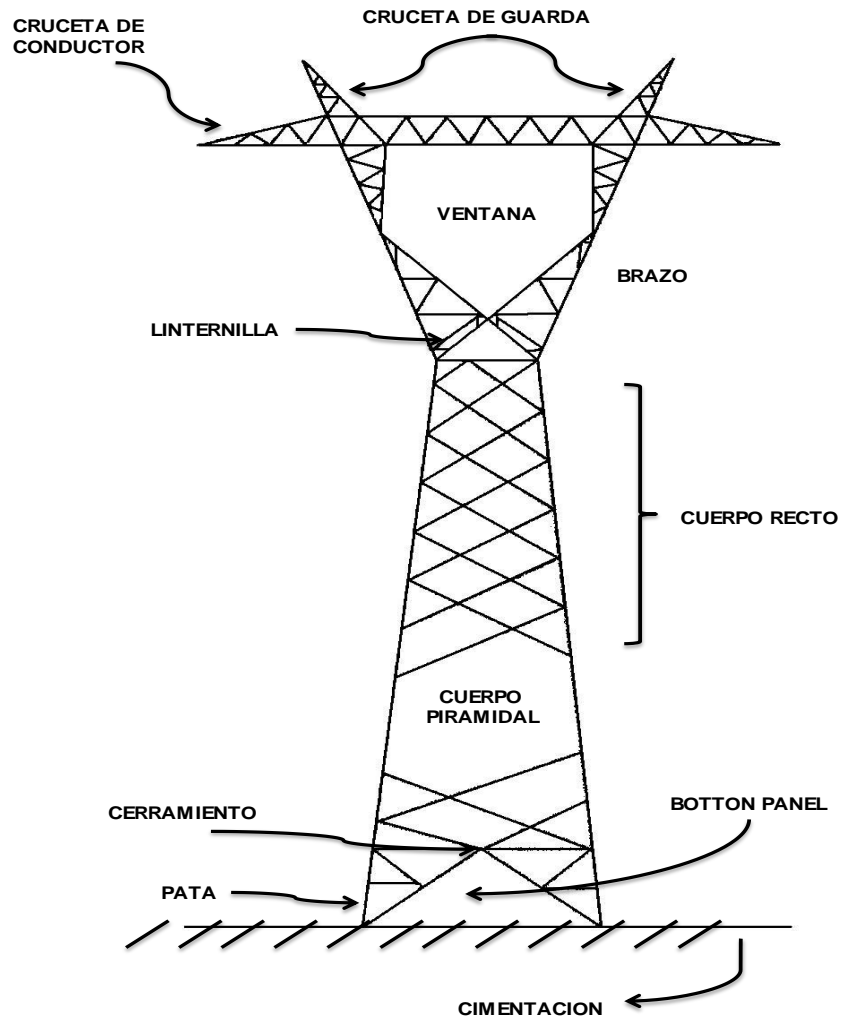
El uso de estas estructuras de acero autoportadas es recomendado para zonas donde hay influencia de vientos superiores a 120 km/h y que su diseño es para 160 km/h



Las estructuras están compuesta de las siguientes partes:

- Cimentación
- Botton-Panel
- Cuerpo Piramidal
- Cuerpo Recto
- Brazos
- Crucetas de Conductores
- Crucetas de hilos de guarda

Estas partes se describen en la figura siguiente:



El hecho de que todas las estructuras metálicas de las Líneas de Alta Tensión estén expuestas a los agentes naturales como, el agua, el aire, y las variaciones de temperatura ambiente, da como resultado, que en alguna proporción o en otra se presenta la corrosión, dependiendo de ello la ubicación de la instalación.

Cuando se efectúa la inspección de una línea debe revisarse cuidadosamente el estado que guardan tanto la tornillería y todos los ángulos que forman parte de la estructura con el fin de detectar partes o zonas dañadas para que basados en dicha inspección se programe la reparación a base de la aplicación de algunas pinturas o sustancias anticorrosivas.

Notas

- 1.- Se anexa en el disco la ubicación en Google Earth de todas las descargas atmosféricas ocurridas del 2011 al 2016.
- 2.- Se anexan las líneas digitalizadas en Google Earth.
- 3.- Se anexan las estructuras de la línea SAB-73750-TXN ubicadas en Google Earth.