

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO
Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez
Ingeniería Eléctrica

Informe Final del Proyecto de Residencia Profesional

**“Estudio y Mejora del Sistema de Tierra de la Línea ANG-
73730-MAP”**

Desarrollado por:

Héctor Zúñiga Márquez

Martin de Jesús Arias Parada

Asesor Interno:

Ing. Salvador Hernández Garduza

Asesor Externo:

Ing. Ángel Gabriel Bustillos Nucamendi



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 9 de Junio del 2017

**Índice**

1. Introducción	6
1.1.-Antecedentes	6
1.2.-Estado del arte	7
1.3.-Justificación.....	9
1.4.-Objetivo.....	10
1.5.-Metodología	10
2.-Fundamento Teórico	12
2.1.-Líneas de Transmisión	12
2.1.1 Características de una Línea de Transmisión	14
2.1.2 Tipos de líneas de transmisión	15
2.1.3 Líneas de Transmisión de Cable Abierto	15
2.1.4 Par de Cables Protegido con Armadura.....	16
2.1.5 Longitud Eléctrica de una Línea de Transmisión.....	16
2.1.6 Estructuras Normalizadas para Líneas de Transmisión.....	16
2.1.6.1 Torres de Acero	18
2.1.6.2 Torres Autosoportadas por Celosías.....	18
2.1.6.3 Torres Autosoportadas Tubulares.....	19
2.1.6.4 Torres con Retenidas	20
2.2 Clasificación de las diferentes Fallas Eléctricas en Líneas de Transmisión.....	20
2.2.1 Incidencia de Descargas Atmosféricas	23
2.2.2 Densidad de Rayos a Tierra.....	25
2.2.3 Número de descargas que inciden en una Línea de Transmisión.....	26
2.2.4 Cables de guarda en torres de alta tensión y rayos.	27
2.2.5 Intensidad de corrientes de falla	29
2.2.5.1 Corrientes máximas de corto circuito a tierra.....	30
2.2.5.2 Tipos de fallas a tierra	30
2.2.5.3 Componente simétrica de la corriente a tierra de la falla en el instante de la falla ..	30

2.2.5.4 Factores de corrección considerados en el cálculo de las corrientes de corto circuito	31
2.3 Resistividad del Terreno.....	31
2.3.1 Dependencias de las Características Eléctricas del Terreno.....	32
2.3.1.1 Factores que Influyen en la Resistividad del Terreno	33
2.3.2 Que es una instalación de puesta a tierra.....	36
2.3.2.2 Instalaciones de puesta a tierra	36
2.3.2.3 Funciones y objetivos básicos de una instalación de puesta a tierra	37
2.3.2.4 Clasificación de los sistemas de puesta a tierra.....	39
2.3.2.5 Elementos que Conforman un Sistema de Puesta a Tierra.....	40
2.3.2.5.1 Conductores.....	40
2.3.2.5.2 Sistemas de electrodos.....	40
2.3.3 Naturaleza de las corrientes a tierra.....	44
2.3.3.1 Orígenes de las corrientes a tierra.....	44
2.3.3.2 Importancia y trascendencia de las corrientes a tierra	45
2.3.3.3 Efectos Fisiológicos de las Corrientes a Tierra	47
2.3.3.4 Problemas Básicos de la Red de Tierras.....	47
2.3.3.5 Ventajas de un Sistema Eficazmente Aterrizado.....	48
2.3.3.6 Problemas Típicos que se Encuentran en el Diseño de un Sistema de Tierra.....	48
2.4 Medición de la Resistividad del Terreno de una Torre de una línea de Transmisión	52
2.4.1 Resistividad del Terreno.....	52
2.4.2 Medición de la Resistividad del Suelo y Resistencia Eléctrica en Líneas de Alta Tensión en Construcción	53
2.4.4 Medición de la Resistencia Eléctrica de la Red de Tierras para Líneas de Alta Tensión en Construcción.....	54
2.4.5 Método de Wenner	57
2.4.6 Medición de la Resistencia Eléctrica de la Red de Tierra	59
Medición de resistencia con resistividad del suelo mayor a 100 Ω -m	61
2.4.7 Mejoramiento de la red de tierra al pie de la torre.....	61
2.4.7.1 Reducción de Valores de Resistencia de Conexión a Tierra en Torres de Transmisión	64
2.4.8 Reducción de la Resistividad del Suelo Mediante Procedimientos Artificiales.....	66
2.4.9 Ecuaciones para el Cálculo de Resistencia de varios elementos	73
Resistencia de una Sola Varilla	74

3. Desarrollo	75
3.1 Descripción de los circuitos realizados	76
3.2 Descripción de las pruebas, correcciones y validación	77
4. Resultados y Conclusiones	95
Anexos	99
Apéndice: A	99
Índice de Interrupciones por Flameo Inverso	99
Apéndice B	103
Listado de abreviaturas y símbolos	103

1. Introducción

Las líneas de transmisión son un medio eléctrico que brinda la oportunidad de transportar potencia eléctrica a grandes distancias desde su punto de generación. En Ingeniería es importante contar con los conocimientos para diseñar este tipo de rutas eléctricas que permitan satisfacer diferentes necesidades pero también es importante contar con las bases para poder proteger un sistema de este tipo.

El presente reporte titulado: “Estudio y Mejora de la Línea ANG-73730-MAP ”, tiene como objetivo primordial establecer bases de fácil entendimiento para comprender el origen de una falla, su comportamiento en la línea, la función del cable de guarda y el drenado de una corriente indeseada a tierra.

La línea ANG-73730-MAP está conformada por 113 000 km de línea, 337 estructuras y que se catalogan en torres de acero de suspensión y de remate. 291 torres de esta línea están al cuidado de la oficina de líneas de subtransmisión, ubicada en la subestación Tuxtla norte, en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

En este trabajo, se encontrarán las bases para realizar los estudios previos a la instalación de una red de tierra en una línea de subtransmisión y una nueva propuesta de sistema de puesta a tierra para líneas de subtransmisión, se detallarán los métodos empleados para la obtención de datos requeridos para esta y se describirán los componentes, procedimientos y procesos para establecer una. Así mismo, se darán a conocer técnicas empleadas para mejorar dicha protección de una forma sencilla y amena.

Este reporte ha sido realizado con el fin de complementar los estudios en ingeniería eléctrica y establecer las bases para poder comprender el diseño de una red de tierra, las necesidades y ventajas de contar con una, así como los procedimientos para optimizarla.

1.1.-Antecedentes

La línea ANG-73730-MAP es una de las líneas con más kilómetros en el estado de Chiapas, comienza desde la subestación “Angostura” más formalmente llamada presa Belisario Domínguez y termina hasta la subestación de Mapastepec. Está conformada por 113 000 km y a su vez de 337 torres de acero, que de las cuales se clasifican en dos tipos, torres autosoportadas de suspensión y de remate. De las 337, 291 están al cuidado de la oficina de

líneas de subtransmisión, ubicada en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas y a su vez en la subestación “Tuxtla norte”.

Las condiciones ajenas a las de operación hacen que su inspección sea periódica (como cualquier otra línea de transmisión o subtransmisión), para que por medio de estas acciones se puedan identificar las anomalías que puedan interrumpir la continuidad del servicio eléctrico. Para el caso de esta línea en particular tenemos que algunas de sus torres se encuentran en condiciones de terreno difíciles de acceder ya sea por la altura a las que estas se encuentran o la fauna que habita alrededor de ella.

En archivos de la oficina de líneas de subtransmisión, se tiene un registro de todas las anomalías encontradas en esta línea desde su construcción hasta el día de hoy, sin embargo, muchas de estos registros no han sido del todo correctos con respecto a las fallas o interrupciones que se han presentado. La información reportada por parte del personal de campo ha sido errónea en más de la mitad de los casos y aún más para las torres de difícil acceso.

Las torres con numeración 291, 290, 289 y 288 han sido las de mayor incidencia por descargas atmosféricas. En ellas se ha presentado el fenómeno de “flameo inverso” por no contar con un buen sistema de puesta a tierra respectivamente. Volviendo a dichas estructuras los puntos más críticos de la línea ANG-73730-MAP. En los periodos de mayo a noviembre (temporada de lluvias y huracanes) se tiene registrado un rango de entre 30 a 70 descargas en cada torre, con un valor de corriente por rayo de hasta 200.000 amperios y de 100 millones de voltios.

1.2.-Estado del arte

[1]Tratar de reducir el valor de la resistencia al pie de la torre a un valor de 10Ω como máximo, por ser este un valor que se toma como referencia en las especificaciones de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en realidad el valor de resistencia al pie de la torre se fija de acuerdo al índice de salidas por flameo inverso que quede establecido para descargas a los cables de guarda o estructuras, ya que este tipo de descargas es el que produce flameo inverso.

Las líneas de transmisión que son afectadas por descargas atmosféricas llegan a registrar porcentajes muy elevados en sus índices de salida y uno de los medios más eficaces conocidos para la reducción de las consecuencias causadas por las mismas, es un buen diseño de puesta a tierra en cada una de las estructuras que conforme la línea de transmisión, en función de la resistividad de su terreno y del tipo de estructura. [2] El sistema de puesta a tierra de contra antenas y varillas, en algunos casos, ha demostrado su ineficacia debido a la alta resistividad que representan algunos tipos de suelos.

[3] Se realizó un estudio destinado a mejorar las redes de tierra de estructuras de líneas de transmisión aéreas con la finalidad de abatir los índices de salidas por fallas debidas a flameo de aisladores causado por descargas atmosféricas, mediante la utilización de electrodos y rellenos químicos de baja resistividad, tomando en consideración su efectividad para reducir el valor de resistencia de contacto a tierra de las estructuras, la logística para su aplicación y sus costos.

La resistividad del terreno tiene una relación lineal con la resistencia al pie de la torre, que a su vez tiene una gran influencia con el desempeño de las líneas de transmisión. [4] Cuando una estructura es impactada por una descarga atmosférica, el potencial de la estructura se eleva directamente proporcional al valor de la resistencia al pie de la torre, de manera que para ciertos valores elevados se aumenta la probabilidad de flameos inversos. La trayectoria o trazo de la línea influye en forma directa en el valor de las resistividades del terreno encontradas.

Para poder derivar sin problemas la gran energía de un rayo es preciso responder a altas exigencias en cuanto a las instalaciones eléctricas de estructuras, facilitando una trayectoria segura del rayo al subsuelo. Tradicionalmente, la protección contra descargas atmosféricas ha pretendido atraer y desviar la energía hacia la tierra física instalada, dependiendo del tipo de terreno que se tenga. [5] Dado que la conductividad del suelo tiene valores finitos, la corriente de descarga se distribuye por debajo del suelo en todas las direcciones.

Nuestro sistema de puesta a tierra tiene como característica ser una nueva propuesta hacia los ya existentes en líneas de transmisión, cubriendo todas las necesidades que exigen las normatividades de CFE y ANCE. También cabe resaltar que nuestro sistema no requiere de ningún tratamiento especial al terreno en el que se instala. Su diseño ha sido contemplado

para las condiciones de terreno más críticas de diseño y de resistividad que pueda presentar el terreno.

1.3.-Justificación

Lo que aquí se propone es establecer bases para un diseño alternativo de un sistema de puesta a tierra para las torres de una línea de transmisión que ayude a drenar las corrientes inducidas por descargas atmosféricas y cortocircuitos que no se drenan a tierra produciendo las fallas de: “corriente de frente inverso”, sobrecalentamiento en los conductores de la línea, esfuerzos electromecánicos anormales en las torres de transmisión y en los interruptores que controlan el flujo de corriente que pasa a través de la línea. Para así reducir los costos que originan dichas fallas.

Cuando se realiza un sistema de puesta a tierra con los fundamentos teóricos propuestos, el costo disminuye sin perder su eficiencia y confiabilidad y eso fue una de las intenciones primordiales a la hora de diseñar este proyecto, contar con un sistema que no requiera de mucha inversión pero que la rentabilidad y la funcionalidad que tenga este sistema a largo plazo supere las expectativas del solicitante pudiendo así utilizarlo en cualquier torre de transmisión que tenga las mismas condiciones de suelo en la que fue instalado o un alto índice de descargas atmosféricas.

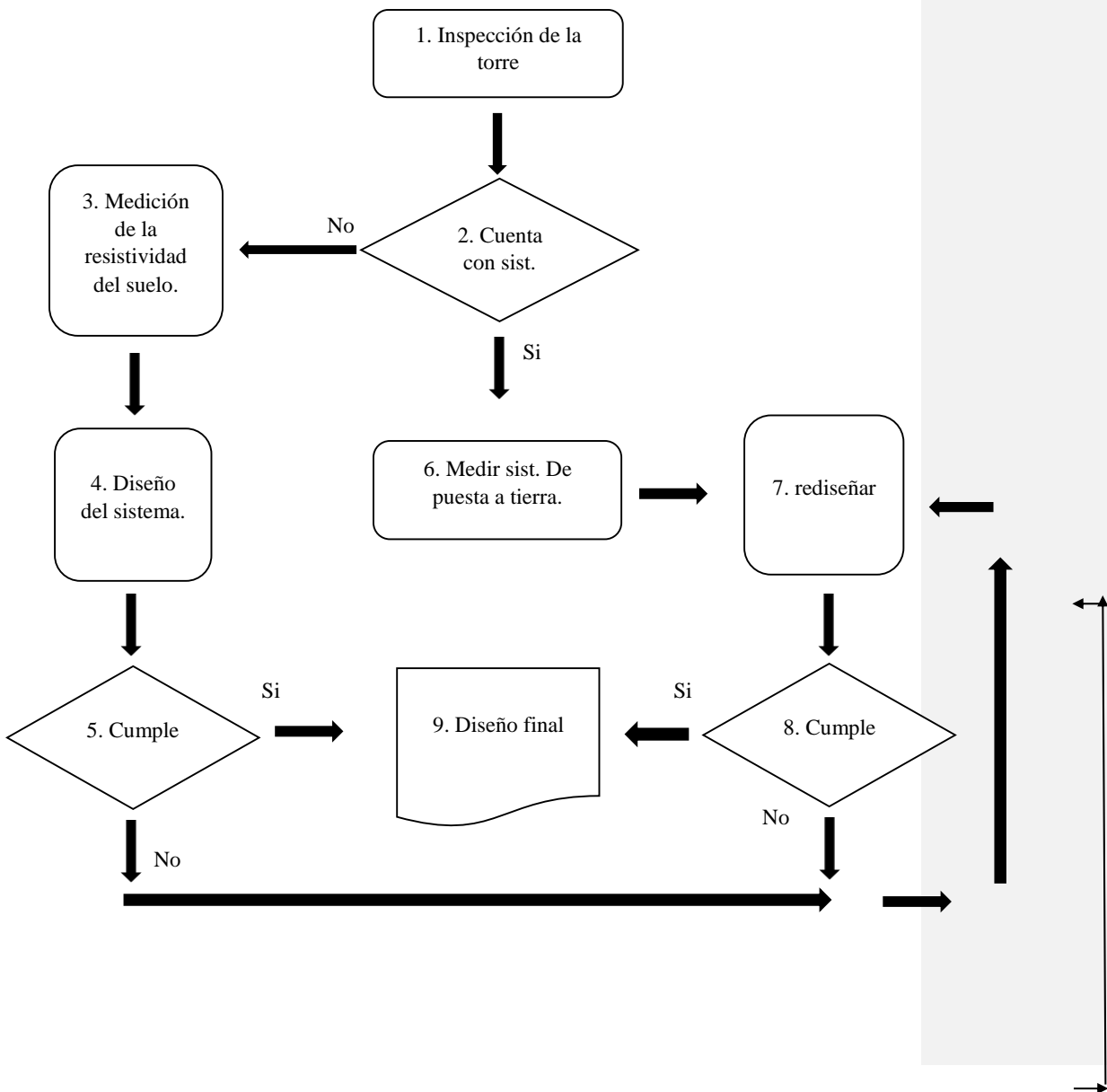
El sistema de puesta a tierra que se propone, mejora la resistividad del suelo en las torres de la línea de subtransmisión ANG-73730-MAP, pues su instalación se adapta a cualquier entorno, haciendo este sistema amigable con el medio en el que se instale pues no pone en peligro a la flora y fauna que habite cerca de él. Cabe resaltar que todo el tiempo en el que este sistema opere se puede tener la tranquilidad que no se verá afectada la fauna que habite cerca de él o pase cerca pues se ha puesto rigurosa atención en los valores del voltaje de paso permitidos.

Este proyecto es sustentable porque el mantenimiento se reduce sin que el sistema deje de operar, en todo caso no se requiere supervisión a corto plazo para mantener su operación, a diferencia de un sistema de puesta a tierra que sea instalado con mejora de suelo por medio de reactivos químicos pues sabemos que estos requieren un mantenimiento a corto plazo y periódico para ver que su operación siga siendo la correcta y su eficiencia no disminuya con el paso del tiempo.

1.4.-Objetivo

Diseñar y construir un sistema de puesta tierra para la línea ANG-73730-MAP, que sin necesidad de un mejoramiento del terreno, su resistividad se encuentre dentro de los estándares por la norma de CFE 00J00-52, para reducir el índice de fallas producidas por descargas atmosféricas y cortocircuitos para mantener la continuidad y la calidad del servicio eléctrico.

1.5.-Metodología



Paso 1.- En este paso se inspecciona si la torre cuenta con sistema de puesta a tierra, de no contar se realizará la medición de resistividad del terreno (**paso 3**), si este cuenta con dicho sistema se realizará su medición (**paso 6**) para corroborar que este cuenta con los valores establecidos por la norma 00J00-52 de CFE.

Paso 2.- De contar con algún sistema de puesta a tierra se tomaran mediciones (**Paso 6**) al sistema para corroborar si este sistema cumple con los valores establecidos por la normatividad vigente (CFE 00J00-52), en dado caso de no cumplirse se efectuara una mejora del diseño (**Paso 3**). En todo caso si la torre de transmisión no cuenta con un sistema de tierra se implementaran los métodos de medición de resistividad del terreno para posteriormente diseñar uno.

Paso 3.- En este paso se toma medición de la resistividad del terreno dentro de la estructura con una separación entre electrodos de 1.6 m o 3.2 m si las lecturas del terreno no son las deseadas como lo indica el método de Wenner (método utilizado para este caso en particular). De tener el valor deseado posteriormente se diseñara el sistema (**paso 4**).

Paso 4.-En el diseño y el cálculo de un sistema de puesta a tierra se establecen varios tipos de arreglos. En este punto se calculó tomando en cuenta los siguientes parámetros: las condiciones del lugar, el entorno y la más importante la resistividad del suelo. A partir de estos puntos se diseñará la mejor propuesta de sistema de puesta a tierra que no rebase los valores establecidos por la norma ya mencionada anteriormente (**paso 5**). De no cumplir se

Paso 5.-Se optará como la mejor propuesta si el sistema a instalar cumple con todas las características puestas tanto por la norma como el solicitante. Aquí los puntos a cumplir son: valor de la resistencia de puesta a tierra de bajo del estándar establecido por la norma (en este caso la de CFE 00J00-52), mínimo costo de inversión y que a futuro requiera la menor inversión en cuanto a mantenimiento se refiere. Si se cumplen estos puntos y es aceptado por el solicitante se tomará como el diseño final (**paso 9**), si este no fuese el caso se rediseñará el sistema hasta cumplir todos los puntos solicitados y establecidos (**paso 7**).

Paso 6.- Tomar lectura del sistema de puesta a tierra existente y si este no cumple las características establecidas por la norma, se rediseñara el sistema para mejorarlo (**paso 7**) y que cumpla los valores establecidos por la norma para así tener una propuesta final (**paso 9**).

Paso 7.- En este punto se hacen todas las mejoras al diseño que se haya formulado con anterioridad por no cumplir con los requerimientos por la norma (CFE 00j00-52) y el solicitante. Si después de haber rediseñado el sistema se cumple lo establecido a este se le atribuirá como el diseño y la propuesta final (**paso 9**).

Paso 8.-Cuando la mejora del suelo cumpla con lo establecido en la norma a este se le atribuirá como el diseño final (**paso 9**). Pero en dado caso si rebasara los límites establecidos que permite dicha norma se tendría que rediseñar (**paso 7**) el sistema.

Paso 9.- Aquí se presenta el diseño final del sistema que resolverá la problemática dada por el solicitante y cumpliendo todos los puntos de la normatividad ya mencionada.

2.-Fundamento Teórico

2.1.-Líneas de Transmisión

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

El desarrollo de las aplicaciones industriales de la electricidad que iniciaron a fines del siglo XIX, se orientaron sobre dos caminos, la corriente continua y la corriente alterna, esta última en distintas frecuencias exigidas en algunos casos por distintas necesidades. Pasado el tiempo se fueron unificando en las hoy difundidas 50 y 60 Hz. Si se analiza cual es la mejor frecuencia para la transmisión de potencia eléctrica a gran distancia, se observa que 50 Hz es mejor que 60 Hz, y si se intenta optimizar, se llega a la conclusión que a menor frecuencia, mejor transmisión.

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

Poco a poco las necesidades implicaban transmisiones de potencia eléctrica a través de canales o estrechos en el mar con distancias que superaban los 100 km, donde la transmisión de corriente alterna se hizo imposible. Dando como resultado, la aparición de las primeras transmisiones de corriente directa con dispositivos de gran tamaño con los que se contaba en la década de los sesenta.

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

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

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

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

- Estructuras

Las estructuras mecánicas que soportan las líneas serán tratadas en páginas posteriores, mientras que para conductores, la CFE emplea normalmente conductores ACSR que están compuestos

Conductores

En las líneas de 400 KV se usan dos conductores por fase con el objetivo de reducir la inductancia y el efecto corona.

Los tipos y calibres de conductores normalmente usados en las líneas de transmisión por la CFE son los siguientes:

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



Fig. 2.1 Conductor ACSR.

De un alma de acero que tiene principalmente funciones mecánicas y externamente una o más capas de hilos de aluminio devanadas en forma de espiral.

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

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

- Nivel máximo permisible de ruido

Como estudio de planeación asociado a las condiciones de operación que presentará la línea, se puede hacer un estudio de capacidad o cargabilidad en dicha línea de transmisión. La capacidad se expresa por medio de curvas que relacionan la longitud de la línea con la carga de la misma, el término capacidad no se refiere específicamente a las propiedades físicas del conductor, como por ejemplo el límite térmico, más bien se analizan ciertos criterios que definen esta capacidad y que básicamente los siguientes:

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

Por otra parte, los aisladores representan el punto mecánico de soporte de los conductores en la estructura y cumplen también con la función de proporcionar el aislamiento entre conductor y tierra dando la distancia eléctrica requerida en el aire y siendo estos de vidrio y porcelana. Los herrajes aportan la seguridad en la operación de una línea, dependiendo en forma particular de la confiabilidad que deben tener los elementos de unión de los conductores, para la fijación de los conductores a los aisladores y para la fijación de estos últimos a la torre.

2.1.1 Características de una Línea de Transmisión

Las características de una línea de transmisión se determinan por sus propiedades eléctricas, como la conductancia y la constante dieléctrica del aislante, y sus propiedades físicas, como el diámetro del cable y los espaciamientos entre conductores. Estas propiedades, a su vez, determinan las constantes eléctricas primarias:

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

La resistencia y la inductancia se presentan a lo largo de la línea, mientras que entre conductores y tierra ocurren la capacitancia y la conductancia. Las constantes primarias se distribuyen de manera uniforme a lo largo de la línea, por lo tanto, se les llama comúnmente parámetros distribuidos.

Los parámetros distribuidos se agrupan por una longitud unitaria dada, para formar un modelo eléctrico artificial de la línea. Las características de una línea de transmisión se llaman constantes secundarias y se determinan con las cuatro constantes primarias.

2.1.2 Tipos de líneas de transmisión

Para su estudio, las líneas de transmisión se clasifican generalmente como balanceadas. Con líneas balanceadas de dos cables, ambos conductores llevan una corriente; un conductor lleva la señal y el otro es el regreso. Este tipo de transmisión se llama transmisión de señal diferencial o balanceada. La señal que se propaga a lo largo del cable se mide como la diferencia de potencial entre los dos cables. Las corrientes que fluyen en direcciones opuestas por un par de cable balanceados se les llaman corriente de circuito metálico.

Las corrientes que fluyen en las mismas direcciones se llaman corrientes longitudinales. Un par de cables balanceados tiene la ventaja que la mayoría de la interferencia por ruido (voltaje de modo común) se induce igualmente en ambos cables, produciendo corrientes longitudinales que se cancelan en la carga. Cualquier par de cable puede operar en el modo balanceado siempre y cuando ninguno de los dos cables esté con el potencial a tierra, como por ejemplo, el cable coaxial que tiene dos conductores centrales y una cubierta metálica.

La cubierta metálica generalmente se conecta a tierra para evitar interferencia estática al penetrar a los conductores centrales. Con una línea de transmisión desbalanceada, un cable se encuentra en el potencial de tierra, mientras que el otro cable se encuentra en el potencial de la señal. Este tipo de transmisión se le llama transmisión de señal desbalanceada o de terminación sencilla. Con la transmisión de una señal desbalanceada, el cable de la tierra también puede ser la referencia a otros cables que llevan señales.

2.1.3 Líneas de Transmisión de Cable Abierto

Una línea de transmisión de cable abierto es un conductor paralelo de dos cables. Consiste simplemente de dos cables paralelos, espaciados muy cerca y sólo separado por aire. Los espaciadores no conductivos se colocan a intervalos periódicos para apoyarse y mantenerse a la distancia entre las constantes entre los conductores. Las distancias entre los dos conductores generalmente están entre 2 y 6 pulgadas.

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

2.1.4 Par de Cables Protegido con Armadura

Para reducir las pérdidas por radiación e interferencia, frecuentemente se encierran las líneas de transmisión de dos cables paralelos en una malla metálica conductiva. La malla se conecta a tierra y actúa como una protección. La malla también evita que las señales se difundan más allá de sus límites y evita que la interferencia electromagnética llegue a los conductores de señales.

2.1.5 Longitud Eléctrica de una Línea de Transmisión

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

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

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

2.1.6 Estructuras Normalizadas para Líneas de Transmisión

La industria en general necesita del diseño de estructuras que por su complejidad y exigencias de operación requieren de un análisis especial que también garantice su buen funcionamiento y bajo costo. Estas acciones implican una fuerte actividad de análisis y diseño estructural. La solución a problemas del análisis y diseño de estructuras se basa fundamentalmente en el desarrollo, elaboración y uso de modelos numéricos y matemáticos que permitan predecir la

respuesta de las estructuras y técnicas para optimar los diseños. Así se han desarrollado e implementado metodologías especializadas para optimar el diseño de las estructuras y el análisis de casos específicos. Dichas metodologías y han sido elaboradas por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE).

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

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

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

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

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

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

2.1.6.1 Torres de Acero

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

Por su tipo, pueden ser:

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

2.1.6.2 Torres Autoportadas por Celosías

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

Clasificación:



- Tipo Suspensión.
- Tipo Tensión.
- Tipo Remate.
- De Transposición.

La gran mayoría de las líneas de transmisión usadas en la CFE son del tipo autoportadas con celosía

Fig. 2.2 Torre Autoportada.

De las llamadas de suspensión. Las torres de tensión se aplican en menor número para cambios de dirección, cruzamientos y zonas en donde se requiere obtener una mayor altura de los conductores.

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

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

2.1.6.3 Torres Autosoportadas Tubulares

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

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



Fig. 2.3 Torres Autosoportadas Tubulares.

2.1.6.4 Torres con Retenidas

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

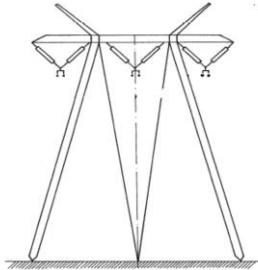


Fig. 2.4 Torres con Retenidas.

2.2 Clasificación de las diferentes Fallas Eléctricas en Líneas de Transmisión

Los Sistemas eléctricos de Transmisión están sometidos a diversos fenómenos que producen distintos tipos de fallas o perturbaciones eléctricas. Entre los fenómenos físicos causantes de una falla eléctrica, podemos mencionar: viento, incendios, caída de torres, fallas en maniobras, descargas atmosféricas, etc. Estos fenómenos pueden originar diversos tipos de fallas como por ejemplo: falla monofásica, falla bifásica, falla trifásica, sobretensión, etc.

Las fallas que se producen en un Sistema de Transmisión de Energía Eléctrica se aíslan mediante la actuación de sistemas automáticos llamados Protecciones, los cuales producen la salida de servicio de uno o más segmentos de, en este caso, la línea, afectados por la falla. La consecuencia directa de esta acción cuyo objetivo es proteger al equipamiento de las sollicitaciones generadas por la falla, produce como efecto colateral, la reducción de la capacidad de transmisión, lo cual significa una afectación directa tanto a usuarios como generadores.

Ante una falla, la empresa encargada del suministro de energía eléctrica debe hacerse cargo de la reposición de las partes afectadas, los gastos de mantenimiento y también la mano de obra necesaria.

Existen multas que se calculan en función del segmento afectado (un transformador, una línea, una barra, etc.) y del tiempo de permanencia fuera de servicio. Este último componente

de la penalización es tan importante que si por ejemplo, la recuperación del suministro se produce antes de los 10 minutos de producida la falla, la empresa de transporte resulta exenta del pago de la multa, es por ese motivo que dichas empresas invierten grandes recursos en adquirir tecnología, adiestramiento y estudios, a fin de lograr resultados concretos en este tema.

El análisis de fallas es una tarea esencial del especialista en protecciones. Luego de ocurrida la falla el especialista accede a la información capturada por el Registrador Cronológico de Eventos (RCE), que es almacenada en una base de datos. Con esta información el especialista realiza el diagnóstico de donde se produjo la falla y cuál es su causa. En el transcurso de una falla, se generan eventos de diversa índole, no todos ellos relacionados con el fenómeno a estudiar, por esto el especialista debe identificar el comienzo de la falla y filtrar la información que es relevante para el análisis.

Como tarea complementaria al diagnóstico, los especialistas monitorean ante cada falla, la actuación de las protecciones con el objeto de detectar cualquier indicio de defecto que pueda ocasionar en el futuro, problemas graves como por ejemplo: la salida incorrecta de algún segmento del sistema, la actuación retardada de la protección, la actuación incorrecta de algún módulo de la protección etc.

Una falla eléctrica puede ocurrir en cualquier parte de un sistema eléctrico de potencia, esto quiere decir que podemos encontrar una falla en la línea de transmisión del sistema, en terminales de algún transformador, en terminales de cargas dinámicas como lo son los motores eléctricos, etc.

Generalmente las fallas se clasifican en Falla Simétricas y Fallas Asimétricas, la Falla Simétrica es también conocida como Falla Trifásica y tiene lugar cuando las tres líneas de transmisión o un punto de cada una de ellas, tiene contacto entre sí simultáneamente, mientras que las Fallas Asimétricas se clasifican a su vez en:

- Fallas de Línea a Tierra (LT):

Tiene lugar cuando una de las tres líneas de transmisión hacen contacto con un punto de diferencial cero, tierra.

- Fallas de Línea a Línea (LL):

Se lleva a cabo cuando dos líneas de transmisión hacen contacto entre ellas.

- Fallas de Línea-Línea a Tierra (LLT):

Tiene lugar cuando tres diferentes puntos entran en contacto, dos de ellos provenientes de diferentes líneas y el resultante de la tierra. Para el análisis y obtención de una corriente de corto circuito en Fallas Asimétricas es necesario utilizar procedimientos matemáticos basados en redes secuenciales que tienen la intención de formular un comportamiento simétrico a partir de uno asimétrico, que es el proveniente del problema.

Para poder analizar un sistema en falla, serán necesarias tres redes diferentes que representarán al sistema en:

- Red de secuencia Positiva. (+)
- Red de secuencia Negativa. (-)
- Red de secuencia Cero. (0)

Red de Secuencia Positiva

Durante la operación normal del sistema existen únicamente corrientes y voltajes de secuencia positiva, por lo tanto en el estado estable la impedancia es la red de secuencia positiva. En la ocurrencia de la falla, la corriente de falla cambia de 0 a I_1 y el voltaje de secuencia positiva en la rama cambia de V a V_1 , reemplazando esta por una fuente de tensión con un valor igual al cambio de voltaje y cortocircuitando todos los voltajes normales de conducción del sistema, por lo que resulta una corriente I_1 que fluye dentro del sistema.

Red de Secuencia Negativa

Sobre la premisa de las cantidades, que las cantidades de secuencia positiva solo aparecen normalmente en un sistema de potencia, entonces las cantidades de secuencia negativa pueden operar solamente durante el desbalanceo originado por una falla. Las impedancias de secuencia negativa son generalmente los mismos valores a la impedancia de secuencia positiva.

Comentado [H1]: añadir brevemente significado secuencia positiva, negativa, cero

Los diagramas de secuencia negativa son similares a las de secuencia positiva, con dos importantes diferencias, generalmente no existen fuentes de contribución a la falla y el voltaje de secuencia negativa V_2 es de gran valor al punto de falla.

Red de Secuencia Cero

Las corrientes y voltajes de la red de secuencia cero-co-lineales es decir todas tienen la misma fase. Por lo que las corrientes de secuencia cero, fluyen al sistema y debe retornar por la conexión de tierra del neutro, en general $Z_1 \neq Z_0$, y el valor de Z_0 varía de acuerdo al tipo de planta.

Al contar con los tres valores de impedancia equivalente respecto a la falla, se procederá a crear arreglos para la obtención de la corriente secuencial de corto circuito de la siguiente manera:

- Fallas de Línea a Tierra. (LT): Todas las redes secuenciales se conectarán en serie.
- Fallas de Línea a Línea. (LL): Se conectará en serie la red de secuencia positiva con la red de secuencia negativa.
- Fallas de Línea-Línea a Tierra. (LLT): Todas las redes secuenciales se conectarán en paralelo.

Notas:

Es importante destacar que:

- La red de secuencia positiva incluirá una fuente de voltaje de Thévenin respecto al lugar donde se localice la falla.
- Dicha fuente de voltaje será, generalmente, igual a uno con un ángulo polar de cero grados ($1 \angle 0^\circ$) a menos que se especifique que se trabaja a un voltaje diferente al nominal.
- Una vez obtenida la corriente de falla se deberá llevar a cabo otro procedimiento para obtener los valores asimétricos, puesto que los calculados son valores secuenciales.

2.2.1 Incidencia de Descargas Atmosféricas

A aquellas descargas naturales producidas normalmente durante las tormentas eléctricas, se les conoce como descargas atmosféricas. Las descargas atmosféricas se clasifican por la

polaridad de la carga en la nube, ya sea positiva o negativa y por la dirección de propagación del líder inicial o guía escalonada, ya sea ascendente o descendente.

En zonas cercanas a los polos, las descargas más frecuentes son aquellas que tienen polaridad positiva, en nuestro país, en promedio, el 90% de rayos a tierra son de polaridad negativa con 45 a 55% de estas con un solo rayo de retorno. En una línea de Transmisión, el tipo de descarga más común que suele producir problemas es la descarga a tierra con polaridad negativa.

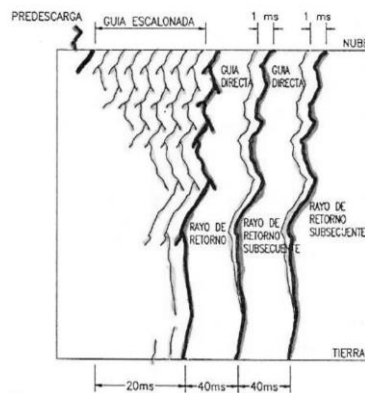


Fig. 2.5 Incidencia de Descargas Atmosféricas.

Durante una descarga se llevan a cabo procesos muy variables tanto en espacio como en tiempo. Luego de que ocurre un rayo de retorno, existe una gran probabilidad de que ocurra.

Proceso	Tiempo	Lugar
Pre descarga	Duración menor de un microsegundo.	Descarga dentro de la nube.
Guía escalonada	Sucede a intervalos de tiempo de alrededor de 50 μ s con una duración total de aproximadamente 100ms.	Desde la nube se prolonga hasta cerca del nivel tierra, cambia de dirección en forma de escalones, con secuencia aproximadas de 50m cada uno
Guía ascendente	Se forma antes que la guía escalonada llegue a tierra.	Comienza en la superficie de la tierra u objetos altos.
Rayo de retorno	Neutralización de la carga en la guía escalonada aproximadamente de 100 μ s a 200 μ s.	Desde la unión de las guías hasta la base de la nube.
Guía Subsecuente	Más rápida que la escalonada.	El mismo canal que el rayo de retorno, sin ramificaciones.
Descarga Subsecuente	Descarga con intervalos de tiempo de aprox. 50 μ s	En el mismo canal del rayo de retorno.

Tabla. 2.1 Proceso de una descarga atmosférica.

Una o varias descargas subsecuentes por el mismo canal de descarga, en promedio, luego de este fenómeno se presentan tres descargas subsecuentes.

La Guía Ascendente es el proceso en el cual ambas guías se unen, es considerado en estudio del radio de atracción para el diseño de blindaje como protección contra rayos directos en líneas de transmisión de energía eléctrica. Mientras que en el proceso llamado Rayo de Retorno se presentan los mayores valores de corriente y es el que produce mayor daño debido a la energía de la descarga. Los valores típicos de las corrientes de los rayos de retorno son de aproximadamente 30 KA y su frente de onda varía entre 1.8 μ s y 18 μ s con un valor promedio de 5.5 μ s.

La tabla. [2.1] que se muestra a continuación muestra la última etapa antes de que el rayo de retorno se produzca, en esta etapa se desarrolla la guía ascendente cuya longitud depende de la carga que tenga la guía descendente.

2.2.2 Densidad de Rayos a Tierra

La densidad de rayos a tierra es uno de los parámetros de importancia en el diseño de la protección a líneas de transmisión eléctricas. Con la ayuda de contadores de rayos, los cuales registran el número de rayos a tierra en un área determinada, podemos determinar la densidad de rayos a tierra. Gracias a estos datos, podemos obtener una idea basada en estudios estadísticos que nos permitirán Organizar un sistema de protecciones que garantice la seguridad del sistema durante una falla.

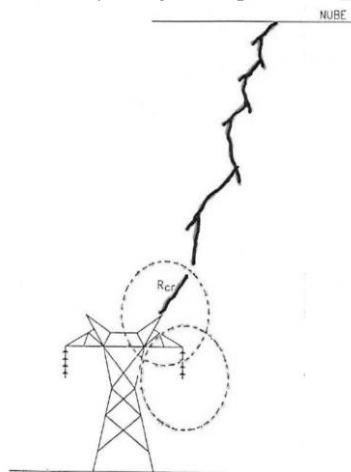


Fig. 2.6 Densidad de Rayos a Tierra.

En México se tiene la información obtenida por una red de contadores de rayos en toda la República, esta información se fue recabada con la operación de los contadores durante once años. A continuación se muestra un mapa de la República Mexicana con áreas de una misma densidad de rayos a tierra, indicando el número de rayos a tierra por kilómetro cuadrado y por año. Estos valores representan un promedio de los valores registrados durante estos once años de operación y recopilación de datos.

Mapa de Isodensidad de Rayos a Tierra

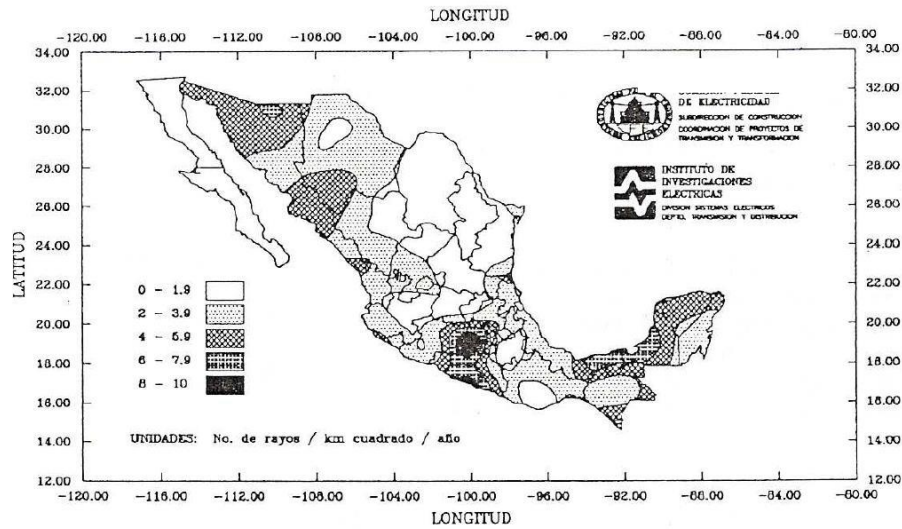


Fig. 2.7 Densidad de Rayos a Tierra.

2.2.3 Número de descargas que inciden en una Línea de Transmisión

El estudio del blindaje de una línea de transmisión comienza por el cálculo de la distancia de atracción o radio crítico para los conductores de fase e hilos de guarda de acuerdo a la fórmula propuesta por Erikson, quien a través de su experimentación con torres de transmisión de diferentes alturas, propuso una relación entre el radio crítico o de atracción y la altura promedio de la torre. Esta relación se obtuvo por medio del ajuste de sus curvas experimentales de todos sus datos experimentales usando mínimos cuadrados.

$$R_{cr} = 14H_T^{0.6}$$

Donde:

R_{cr} = Radio crítico o de atracción (m)

H_T = Altura promedio de la torre o del conductor (m)

Posteriormente, se obtiene el número de rayos directos a la línea de acuerdo al tipo de terreno donde se encuentra la línea de transmisión. Mediante un modelo dinámico matemático del

desarrollo de la guía escalonada, se han obtenido resultados del número de rayos que inciden en líneas de transmisión para diferentes condiciones de terreno, como lo son el terreno plano, en laderas y picos de montañas.

2.2.4 Cables de guarda en torres de alta tensión y rayos.

Los cables de guarda instalados en las líneas de alta tensión, son cables sin tensión que se colocan en la parte más alta en las redes de alta tensión, se conectan a la misma estructura metálica en cada torre y sirven para varios motivos. Uno es el generar un equipotencial de tierra en todo el trazado de la línea, rebajando al mínimo la resistencia de tierra ya que con el cable se unen todas las torres y por defecto toda la toma de tierra del trazado. Otro motivo es para intentar captar el rayo durante las tormentas y conducirlo a tierra.

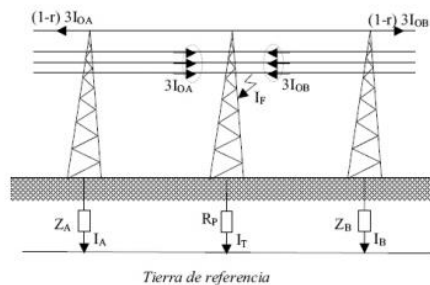


Fig. 2.8 Cable de guarda.

Por una parte lo primero es bueno para reducir el riesgo eléctrico a las personas que toquen una torre de alta tensión, y minimizar así las posibles tensiones de paso que pueden generarse. Por otra parte es perjudicial porque es sabido que esto facilita que el rayo encuentre un camino de resistencia baja en los puntos más altos, cuando el rayo impacta en la torre, aparecen en más o menos medida fugas de corriente de alta tensión por las estructuras, poniendo en riesgo a las personas que estén cerca de la torre en ese preciso instante.

Otro motivo perjudicial a nivel de seguridad eléctrica y del propio transporte de energía es cuando un rayo impacta en el cable, éste sufre una degradación de material, es decir, la energía generada del rayo en el punto de contacto del cable, crea la fusión del material y

perdida de éste por un lado, y por otro, la modificación de su resistencia mecánica. Un cable afectado por rayo, es un peligro inminente para el suministro eléctrico, ya que se puede partir y cortocircuitar los cables de tensión que están por debajo de él.

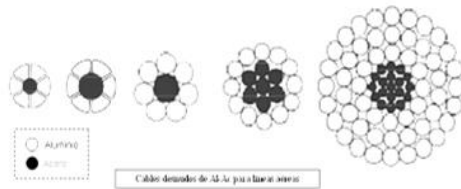


Fig. 2.9 *Diseño de cables de guarda en torres de alta tensión.*

Las torres son verdaderos pararrayos, dados que están construidas todas de metal y están perfectamente puestas a tierra. Los trazados de las torres, las obligan a pasar por puntos elevados, predominado en ocasiones en lo más alto de las montañas. Una torre bien diseñada e instalada, puede padecer esfuerzos térmicos cada vez que es impactada directamente por un rayo, la resistencia mecánica de una torre de alta tensión puede debilitarse después de padecer una descarga de rayo.

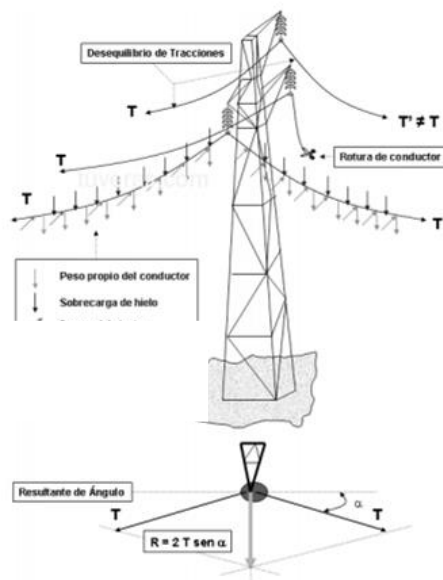


Fig. 2.10 Ilustración Hilo de guarda en torres de alta tensión.

2.2.5 Intensidad de corrientes de falla

El proyectista o constructor deberá tomar en cuenta los posibles tipos de falla a tierra y sus intensidades máximas en los distintos niveles de tensión existentes en la instalación y tomar el valor más desfavorable. Para el cálculo de las intensidades de falla y de puesta a tierra, se ha de tener en cuenta la forma de conexión del neutro a tierra, así como la configuración y características de la red durante el período subtransitorio.

En el caso de red con neutro a tierra, bien rígido o a través de una impedancia, se considerará a efectos del cálculo de la tensión aplicada de contacto o paso, la intensidad de la corriente de puesta a tierra que provoca la elevación del potencial de la instalación a tierra. En el caso de redes con neutros aislados, la intensidad que se considera para el cálculo de la tensión aplicada de contacto o paso, será el producto de la intensidad capacitiva de falla a tierra por un factor de reducción igual a la relación de la intensidad de la corriente que contribuye a la elevación del potencial de la instalación de tierra y la homopolar del sistema hacia la falla.

2.2.5.1 Corrientes máximas de corto circuito a tierra

Para determinar el valor correcto de la falla a tierra, utilizada en el cálculo del sistema de tierras, se necesita:

- Determinar el tipo de falla posible a tierra que produzca el máximo flujo de corriente entre la malla del sistema de tierra y la tierra adyacente, por lo tanto su mayor elevación de potencial y los mayores gradientes locales en el área de la subestación.
- Determinar por sistemas de cómputo o analizadores, el máximo valor efectivo de la corriente simétrica de falla a tierra entre la malla de tierra y la tierra circundante en el instante de iniciarse la falla.

2.2.5.2 Tipos de fallas a tierra

Son principalmente de dos tipos:

- Falla monofásica a tierra
- Falla trifásica a tierra

Para cualquiera de los dos tipos de falla mencionados, se debe hacer un diagrama equivalente que represente la situación real de los circuitos. El diagrama deberá de incluir todo hilo aéreo neutro que esté conectado al sistema de tierra o a los neutros de los transformadores.

2.2.5.3 Componente simétrica de la corriente a tierra de la falla en el instante de la falla

El máximo valor efectivo de la corriente simétrica de la falla a tierra se calcula por la siguiente ecuación:

$$\frac{I-3E}{(3R+3F+(R1+R2+R0))} + J(X1 + X2 + X0) = AMP$$

En la mayoría de los casos, cuando la resistencia sea despreciable se usa:

$$I = \frac{3E}{(X1+X2+X0)}$$

En las ecuaciones anteriores:

I= valor efectivo de la corriente simétrica en el instante en que se inicia la falla a tierra, en amperes.

- E= Es la tensión de fase a neutro, en Volts.

- R = Es la resistencia de tierra estimada del sistema local de la subestación en Ohms.
- R_f = Resistencia mínima de la falla misma, en Ohms.
- R_1 = Resistencia de secuencia positiva, en Ohms/fase
- R_2 = Resistencia de secuencia negativa, en Ohms/fase
- R_0 = Resistencia de secuencia cero, en Ohms/fase
- X_1 = Reactancia subtransitoria de secuencia positiva, en Ohms/fase
- X_2 = Reactancia de secuencia negativa, en Ohms/fase
- X_0 = Reactancia de secuencia cero, en Ohms/fase

Los valores de R_1 , R_2 , R_0 , X_1 , X_2 , X_0 , son los correspondientes del sistema vistos desde el punto de la falla. Los cálculos se efectúan excluyendo las corrientes que no circulan entre el sistema local de tierra y la tierra circundante.

2.2.5.4 Factores de corrección considerados en el cálculo de las corrientes de corto circuito

En el cálculo anterior, se usan factores de corrección para la determinación de la corriente de falla a tierra que se considera para el cálculo del sistema de tierras. Los factores de corrección se usan en los siguientes casos:

- Cuando sea necesario tomar en cuenta el efecto de desplazamiento de la onda de corriente por corriente continua y los decrementos en las componentes transitorias de corriente directa y alterna de la corriente de falla.
- Cuando sea pertinente tomar en cuenta los aumentos de las corrientes de falla a tierra debidos al crecimiento del sistema eléctrico.

2.3 Resistividad del Terreno

Uno de los tres factores decisivos para el dimensionamiento y comportamiento de un sistema de tierras es la condición del terreno a través del cual van a circular las líneas de corriente, ello involucra no sólo al volumen de terreno sobre el cual esté emplazada la instalación de tierra, sino también el de sus alrededores. En realidad el terreno debe ser considerado como un sistema geológico y geoelectrico.

El cálculo de la resistencia a la propagación de todo electrodo (ya sea sencillo o múltiple) se realiza con base a cierto valor de conductividad del terreno, la cual es variable en un amplio

rango; por conveniencia, el análisis fundamental se desarrolla suponiendo un terreno homogéneo, es decir, que posee la misma naturaleza geológica y geofísica en el volumen de tierra ilimitado por todos lados en el que está embutido el sistema de tierra y por el cual las líneas de corriente se propagan, sin embargo en la realidad y en la mayoría de los casos, el terreno es de naturaleza heterogénea, lo cual causa que el comportamiento del sistema de tierras no resulte según el cálculo hecho para terreno homogéneo, ya que el valor de la conductibilidad ya no corresponde a tal clase de terreno.

Si bien la teoría permite llegar a una expresión matemática para indagar la conductividad macroscópica, es en verdad muy difícil de aplicar en la práctica; y, por otro lado, aunque los efectos de ciertas heterogeneidades son relativamente sencillas de determinar numéricamente en electrodos elementales, no resulta así el caso de electrodos múltiples. De ahí que la ingeniería de puesta a tierra se establezca que aún con la aplicación de la mejor teoría y con las facilidades más sofisticadas, se debe asumir que el resultado será sólo aproximado, y que, por tanto, tendrá que ser mejorado con base a mediciones de campo y las modificaciones consecuentes.

Por supuesto los seleccionados de tales heterogeneidades del terreno tienen consecuencias diferentes sobre el comportamiento del sistema de electrodos, según se trate de una instalación de puesta a tierra de pequeña, mediana o gran dimensión. Por ejemplo durante el cálculo del sistema de electrodos para una extensa subestación (de extra alta tensión) es imprescindible una investigación minuciosa del subsuelo del terreno en que se emplazará, pero también de sus alrededores; no hacerlo puede dar lugar a un dimensionamiento erróneo, es decir que resulte sobredimensionado o, por el contrario, ineficiente (técnica y socialmente) influyendo, por supuesto, en su costo.

2.3.1 Dependencias de las Características Eléctricas del Terreno

Como se ha dicho, el valor de la resistencia de puesta a tierra, y también, como se verá más adelante, el reparto de potencial en el suelo cuando el sistema de puesta a tierra está recorrido por una intensidad de falla, tienen, fundamentalmente, como factor proporcional determinante la resistencia específica o resistividad del terreno y del subsuelo en el que está enterrada. Es por esta razón que la concepción de una red de puesta a tierra requiere, inicialmente, el análisis de la naturaleza del suelo sobre el que vaya a realizarse y, de ahí la

necesidad de tal estudio como primer paso para realizar el proyecto de una instalación de puesta a tierra.

Puede parecer que la investigación de la naturaleza y de la estructura geológica, para determinar la variación de la resistividad en función de la profundidad es más propia de la geofísica pero no es así, pues si bien para calcular la resistencia de una toma de tierra puntual es suficiente el conocimiento del perfil de la resistividad aparente de un terreno, no sucede lo mismo en el caso de una malla de gran extensión, como la de una subestación, por ejemplo.

Una de las bases necesaria para determinar la configuración de una red mallada que abarque una gran superficie es el conocimiento de la resistividad a diversas profundidades.

En efecto, si bien la presencia de filones profundos muy resistentes o muy conductores, puede tener escasa influencia sobre la resistividad aparente del terreno, esas particularidades pueden ser capaces, no obstante, de variar notablemente la resistencia de la red de tierras que se establezca más a flor de la superficie por la deformación que provocan sobre los hieles de corriente. Sin embargo, las resistividades del terreno en la superficie o en la profundidad, raramente se conocen antes del establecimiento de las obras y es frecuente que la realización de las redes de tierras sean las que aporten las primeras indicaciones sobre la calidad de los terrenos cuando, en buena lógica, debería ser el proceso inverso el que prevaleciera.

2.3.1.1 Factores que Influyen en la Resistividad del Terreno

Si bien los componentes más importantes del terreno son, en estado seco, aislante (SiO₂ sílice, el óxido de aluminio, etc.), su resistividad disminuye rápidamente en presencia de sales solubles y de la humedad.

Por otro lado, la composición de la tierra, incluso en lugar determinado, es muy heterogénea, presentándose capas, bolsas, depósitos, etc., tanto horizontal como verticalmente. Las zonas superficiales en que se instalan la toma de tierra tampoco son uniformes y, además, están afectadas fuertemente por los cambios climáticos, lluvias y heladas.

Todo ello hace que la resistividad sea muy variable de un lugar a otro y pueda resumirse en que la modifican, de manera muy notable, los siguientes factores del terreno:

- La composición.
- Las sales solubles y su concentración.

- El estado higrométrico.
- La temperatura.
- La granulometría.
- La compacidad.
- La estratigrafía.

Comentado [MdJP2]: Agregar en parrafo

Composición del Terreno

La variación de la resistividad según la composición del terreno es muy acusada, tropezándose con la dificultad de que las diferentes clases de terreno no están delimitadas como para saber, de antemano, el valor de la resistividad en el punto elegido para efectuar la toma de tierra. Sucede, incluso, que para una misma clase de terreno, situada en distintos parajes, la resistividad puede ser sensiblemente diferente. Los valores extremos que se encuentran en la práctica pueden variar de algunas decenas de Ohm-metro, para terrenos orgánicos y húmedos a una docena de miles para granitos secos.

Sales Solubles y su Concentración

Al ser aislantes los principales componentes del terreno, la conductibilidad del suelo es, esencialmente de naturaleza electrolítica, esto, es, la conducción de corriente tiene lugar, principalmente, a través del electrolito formado por las sales y el agua habitualmente contenida en el terreno.

Estado Higrométrico del Terreno

El contenido de agua o grado de humedad del terreno influye, de forma apreciable sobre su resistividad. Su valor no es constante, ya que varía con el clima, época del año, naturaleza del subsuelo, la profundidad considerada y la situación del nivel freático pero rara vez es nulo, incluso al referirse a zonas desérticas. A medida que el grado de humedad aumenta (cuyo principal efecto es el de disolver las sales solubles), la resistividad disminuye con rapidez pero, a partir de cifras del orden del 15 % en peso, esta disminución es mucho menos acusada, a causa de la práctica saturación del terreno.

Cuando la humedad del terreno varíe considerablemente de unas épocas del año a otras, se tendrá en cuenta esta circunstancia al dimensionar y establecer el sistema de tierra. Se podrá usar recubrimientos de gravas como ayuda para conservar la humedad del suelo.

Temperatura

La resistividad del terreno aumenta a medida que desciende la temperatura y ese aumento se acusa mucho, al alcanzarse los 0 °C, hasta el punto que, a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrolitos, que como se ha visto, influyen decisivamente en la resistividad del terreno, elevándose ostensiblemente la misma. Por ello, en zonas con peligro de heladas, los electrodos se enterrarán a una profundidad que no alcance esa temperatura o se tendrá en cuenta esta circunstancia en el cálculo.

Granulometría

Es un elemento importante que influye, a la vez, sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad y también sobre la calidad del contacto con los electrodos, incrementándose la resistividad con el mayor tamaño de los granos. Esta es la razón de que el valor de la resistividad de la grava sea superior al correspondiente a la arena y que el de ésta supere al de la arcilla. Los suelos de granos gruesos se prestan mal al establecimiento de buenas redes de tierra, circunstancia que se puede remediar rodeando la superficie de los electrodos de un cierto espesor de tierra fina o de otro material relativamente conductor.

Compacidad

La resistividad se ve también afectada por el grado de compactación del terreno, disminuyendo al aumentar éste.

Estratigrafía

La resistividad total de un terreno es la resultante de las correspondientes a las diversas capas que lo constituyan. Puede suceder que una sola capa presente una resistividad tan baja que la influencia de las demás sea imperceptible, tal como cuando se alcanzan zonas de agua o el nivel freático.

Queda, pues, justificado que la resistividad de las capas superficiales de un terreno presente variaciones estacionales bajo el efecto del hielo y la sequedad (que la aumentan) o de la humedad (que la disminuye). Esta acción puede hacerse notar hasta una profundidad de varios metros, en condiciones climáticas extremas y prolongadas.

Puede concluirse en que claramente se ve que la resistividad del terreno es una magnitud variable y que el único camino aceptable para conocer su valor consistirá en medirla, lo que permitirá establecer su magnitud en las condiciones existentes en cada caso.

Otros factores:

La resistividad del suelo es, en ausencia de efectos secundarios, prácticamente independiente de la intensidad de corriente que lo recorre.

Existen, sin embargo, otros factores distintos de los ya enumerados que son susceptibles de modificar apreciablemente la resistividad del terreno pero que, por su naturaleza eléctrica, solo pueden surgir posteriormente al establecimiento de la red de tierra, tales como:

- El efecto de gradientes de potenciales elevados.
- El calentamiento del suelo a consecuencia de la circulación de corrientes de puesta a tierra elevadas o de forma prolongada.

2.3.2 Que es una instalación de puesta a tierra

Es la unión eléctrica con la tierra, de una parte de un circuito eléctrico o de una parte conductora no perteneciente al mismo, definida también como el conjunto formado por electrodos y malla de tierra que conecta a los elementos que deban estar puestos a tierra en una instalación eléctrica, que para este caso será el de una subestación eléctrica de distribución tipo exterior.

2.3.2.1 Definición de la puesta a tierra

La ingeniería de la puesta a tierra es la tecnología de la acción que se ocupa de la aplicación de conocimientos científicos y tecnológicos sustantivos, pero también de conocimientos empíricos comprobados, dirigidos hacia la eficiente, segura y económica utilización de la tierra como elemento eléctrico para fines diversos.

2.3.2.2 Instalaciones de puesta a tierra

El diseño de un sistema de tierra seguro, persigue los dos siguientes objetivos: Proporcionar un medio para llevar las corrientes eléctricas a tierra bajo condiciones normales o de falla, sin exceder los límites operativos de los equipos y procurando dar continuidad al servicio. Asegurarse que una persona que transite o permanezca dentro o cerca de las instalaciones

que tienen equipo eléctrico energizado no se vea expuesta a potenciales peligrosos y pueda sufrir una descarga eléctrica.

Los sistemas de tierra se pueden clasificar de dos maneras desde el punto de vista seguridad: A tom/ani ionios intencionales, los cuales consisten en colocar electrodos a cierta profundidad de la superficie. Alcm/amientns accidentales, establecidos temporalmente por una persona la cual queda expuesta a gradientes de potencial peligrosos en una subestación.

Las personas asumen frecuentemente que un objeto aterrizado puede ser seguro de tocar. Una torre de transmisión que tenga resistencia de tierra muy baja, no es garantía de seguridad. Lo anterior porque no existe una relación simple entre la resistencia de un sistema de tierra y la máxima descarga de corriente a la que una persona puede ser expuesta. Por lo tanto una torre de transmisión que presente una baja resistencia de tierra puede ser peligrosa, mientras que otra torre de transmisión con muy alta resistencia puede ser segura o puede ser diseñada con más seguridad. Por ejemplo si una torre de transmisión no tiene cable de neutro, es muy importante tener una muy baja resistencia de malla.

Muchas de las corrientes de falla entran a tierra causando frecuentemente un incremento en el potencial de paso, como se observa en la figura. Pero si tiene o presenta cable de neutro, gran parte de la corriente de falla retorna a través de la tierra a la fuente.

2.3.2.3 Funciones y objetivos básicos de una instalación de puesta a tierra

Una instalación de puesta a tierra es aquella instalación eléctrica que tiene como misión derivar corriente hacia tierra, o bien establecer contacto con ella; las comentes involucradas pueden ser de naturaleza estacionaria, de alta frecuencia o electromagnética en forma de impulsos, corrientes que pueden ser originadas durante el funcionamiento de un sistema técnico hecho por el hombre o causado por un fenómeno natural. Se demuestra por otra parte, que la puesta a tierra más elemental satisface los requisitos para considerársele sistema, por tanto, se establece que una instalación de puesta a tierra es realmente un sistema de puesta a tierra.

Que se logrará:

- Limitar la diferencia de potencial, que en un momento dado puede presentarse entre estructuras metálicas y tierra.

- Posibilitar la detección de fallas a tierra y asegurar la actuación y coordinación de las protecciones.
- Limitar las sobretensiones internas (de maniobra, transitorias y temporales) que pueden aparecer en la red eléctrica.
- Evitar que las tensiones que originan las descargas de los rayos provoquen.

"flameos inversos", para el caso de instalaciones tipo exterior, particularmente en las líneas aéreas de llegada a la subestación.

La circulación de las intensidades de corriente por la instalación de puesta a tierra, puede originar la aparición de diferencias de potencial entre ciertos puntos, por ejemplo entre la instalación de puesta a tierra y el terreno que la rodea o entre dos puntos del mismo, por cuya razón debe concebirse la instalación de puesta a tierra para que, incluso con la aparición de las diferencias de potencial aludidas se cubran los siguientes objetivos:

- Seguridad de las personas.
- Protección de las instalaciones.
- Mejora de calidad del servicio.
- Establecimiento y permanencia de un potencial de referencia.

Debe hacerse especial énfasis en que la seguridad de las personas es lo que verdaderamente preocupa y se constituye en el fin primordial de la instalación de puesta a tierra, lo que no significa que se deje de reconocer la importancia de los otros tres objetivos.

Por esta razón en la torre de transmisión eléctrica deberá disponer de una protección o instalación de tierra, diseñada en forma tal que en ningún punto normalmente accesible del interior o exterior de la misma donde las personas puedan circular o permanecer, exista el riesgo de que puedan estar sometidas a una tensión peligrosa durante cualquier falla de la instalación o red unida a ella.

Más sin embargo se conoce que es absolutamente imposible, a menos que se abandone totalmente la distribución de energía eléctrica, prevenir en todo momento, en todo lugar y bajo todas las circunstancias, la presencia de tensiones peligrosas. Sin embargo este hecho no ampara la responsabilidad de intentar disminuir esa probabilidad tanto como

razonablemente se pueda. Afortunadamente en la mayoría de los casos mediante un diseño cuidadoso e inteligente esa probabilidad puede reducirse a un valor extremadamente bajo.

Al hacer referencia a la acción del "puenteo" de dos puntos con el cuerpo, se está pensando en el comportamiento profesional del personal sobre la instalación y en el que se podría llamar comportamiento normal de las personas ajenas a ella.

En este punto conviene pues remarcar, que la puesta a tierra no garantiza de algún accidente ante las incalculables conductas, reacciones anómalas, imprudencias que las personas puedan llevar a cabo con respecto a una instalación de alta tensión.

2.3.2.4 Clasificación de los sistemas de puesta a tierra.

La primera clasificación de los sistemas de tierras es en base a su naturaleza:

- Instalación artificial de puesta a tierra.
- Instalación natural de puesta a tierra, siendo las primeras aquellas instalaciones que se construyen específicamente para tal fin, utilizando las diversas clases de electrodos de puesta a tierra. La segunda, en cambio, es en realidad elementos de otros sistemas técnicos, por ejemplo las líneas de tuberías metálicas o de cables de energía con cubierta conductora, cimientos (de estructura metálica, de equipos eléctricos, etc.), vías férreas y hasta vías de agua que se encuentren dentro del ámbito de la instalación que se desea proteger y/o en su proximidad.

La siguiente clasificación que se hará mención aquí es la que distingue a las instalaciones de puesta a tierra:

- Instalaciones de puesta a tierra de servicios.
- Sistemas de tierra de protección.

En este caso la primera es la que se aplica para satisfacer ciertas condiciones del servicio del sistema técnico en cuestión. La segunda, en cambio, es indispensable para asegurar que durante el traspaso de corriente a tierra sus efectos fisiológicos no dañen a los seres vivos que eventualmente estuviesen dentro del ámbito del sistema de tierras o en su proximidad en esos momentos.

2.3.2.5 Elementos que Conforman un Sistema de Puesta a Tierra

Los elementos que constituyen un sistema de puesta a tierra, son: los conductores, los electrodos de tierra, así como también el elemento conector entre el conductor y los electrodos

El elemento central de una instalación de puesta a tierra es el electrodo, que es un elemento metálico (fierro, acero, cobre, aluminio, etc.), por medio del cual se introduce la corriente a la tierra; los electrodos adoptan formas geométricas bien ensayadas para tal fin y son: semiesfera, varilla (pica, tubo, bastón, etc.), conductor o banda, placa y anillo. Son componentes importantes, por supuesto, los conductores de tierra (los que unen al elemento por proteger con el electrodo), los conductores colectores (los conductores que unen a varios electrodos para la operación en paralelo), así como los conectores de unión (que hacen factible la unión correcta entre los diversos elementos del sistema de tierra).

2.3.2.5.1 Conductores

En un sistema de puesta a tierra se utilizan dos tipos de conductores: los de la malla de tierra, que permiten la unión entre los electrodos que conforman el sistema de puesta a tierra, y los de acoplamiento que aseguran que las partes conductivas expuestas (tales como carcasas metálicas) permanezcan unidas a la malla de tierra y al mismo potencial durante condiciones de falla eléctrica.

Estos conductores suelen ser en forma de cable de cobre trenzado desnudo, y el calibre se selecciona para que este sea capaz de soportar la corriente de falla estimada, por la duración considerada, sin que sufra ningún tipo de deterioro.

2.3.2.5.2 Sistemas de electrodos

Cuando la corriente de tierras no es muy intensa y el equipo o elementos por conectar a tierra no están muy separados entre sí, ni de un electrodo, la puesta a tierra puede hacerse por medio de ese único electrodo, con la forma geométrica más conveniente, es decir, la que ofrezca mejor eficiencia y requiera un menor gasto; sin embargo, cuando por el contrario, la corriente a tierra sea muy elevada y todos los medios de servicio y elementos por conectar a tierra estén muy desparramados sobre una superficie más o menos extensa, se necesita utilizar varios electrodos y conectarlos de manera que trabajen en paralelo, integrándose de esta manera los llamados electrodos múltiples . Así se integran sistemas de electrodos con un único tipo de electrodos elementales (con varillas, bandas, anillos, etc.).

Barras

Las barras son los electrodos más comúnmente usados en los sistemas de puesta a tierra

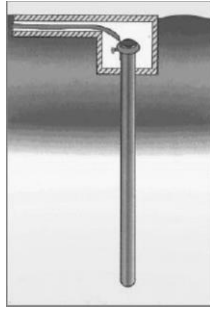


Fig. 2.11 Ilustración de Electrodo.

El material de la barra es de cobre puro o de acero recubierto de cobre. El tipo recubierto se usa cuando la barra se entierra por medios mecánicos (impacto) ya que el acero empleado tiene alta resistencia mecánica. La capa de cobre debe ser de alta pureza y aplicada electrolíticamente para que no se deslice al enterrar la barra.

La resistencia de una barra vertical de radio a [m] y longitud l [m] enterrada desde la superficie en un terreno de resistividad equivalente ρ_e [Ω] es:

$$R = \frac{\rho_e}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{4l}{a}\right) - 1 \right] \quad [\Omega]$$

Placas

Los electrodos de placa tienen su longitud y ancho mucho mayor que su espesor, son de cobre o de acero galvanizado.

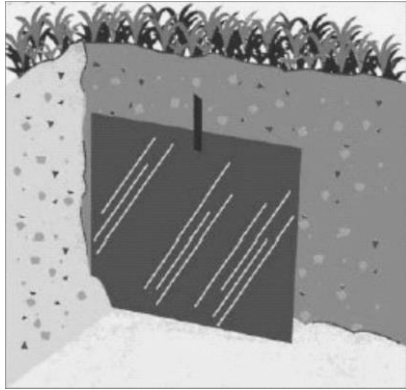


Fig. 2.12 Ilustración de placa de puesta a tierra.

Una expresión simplificada para determinar su resistencia de puesta a tierra es:

$$R = \frac{0,8\rho_e}{L} \quad [\Omega]$$

Siendo L [m] la profundidad máxima y ρ_e [ohms-m] la resistividad equivalente del terreno.

Electrodos Horizontales

Los electrodos horizontales están hechos de cintas de cobre de alta conductividad o conductores retorcidos (cables). La cinta es el material más conveniente pues para una sección dada de material presenta una mayor superficie y se considera que tiene un comportamiento mejor a alta frecuencia.

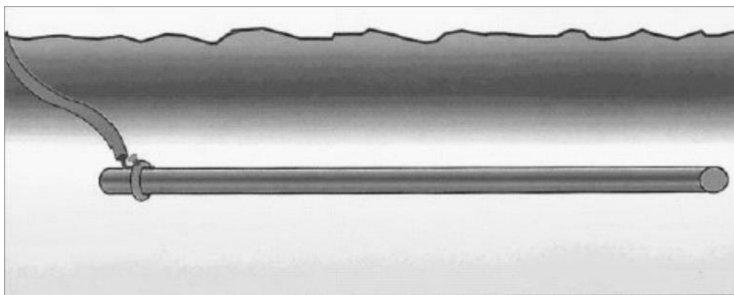


Fig. 2.13 Electrodo en posición Horizontales.

La resistencia de un conductor cilíndrico horizontal de radio a [m] y longitud l [m] enterrado a una profundidad de h [m], con $h < l$, es:

$$R = \frac{\rho_e}{2\pi l} \left[L_n \left(\frac{2l^2}{ah} \right) - 2 + 2\frac{h}{l} - \frac{h^2}{l^2} + \frac{h^4}{2l^2} K \right] \quad [\Omega]$$

Mallas a tierra

Las mallas a tierra son redes formadas por la unión de conductores horizontales, normalmente en direcciones perpendiculares y uniformemente espaciados, incluyendo eventualmente conductores verticales.

Para efectuar un cálculo aproximado de su resistencia de puesta a tierra, se utiliza la expresión de Laurent:

$$R = \frac{\rho_e}{4\sqrt{S/\pi}} + \frac{\rho_e}{L} \quad [\Omega]$$

Donde:

ρ_e : resistividad equivalente del terreno [ohm-m]

S : superficie que cubre la malla [m²]

L : longitud total de conductor de la malla [m]

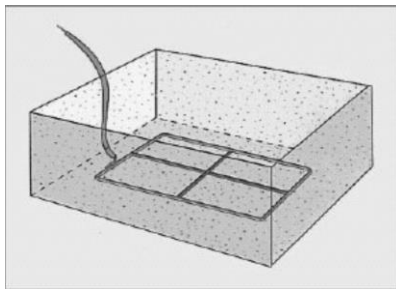


Fig. 2.14 Mallas a tierra de 4 secciones.

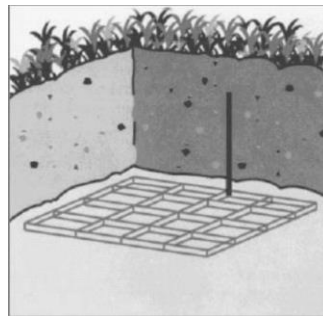


Fig. 2.15 Mallas a tierra de 16 secciones.

Conexiones

La conexión es el medio mediante el cual se unen los electrodos de tierra a los conductores de acoplamiento, esta conexión debe ser mecánicamente robusta, tener buena resistencia a la corrosión y baja resistividad eléctrica.

El tipo de conector más frecuentemente usado es el de la unión exotérmica, que se basa en propiciar una fusión entre las partes de conductor a conectar mediante elevadas temperaturas, resultante de la reacción de una pólvora especial de óxido de cobre y aluminio dentro de un molde de grafito, logrando formar una unión molecular entre todos los hilos del conductor. En la Fig. Se muestran unos ejemplos de este tipo de conexión.

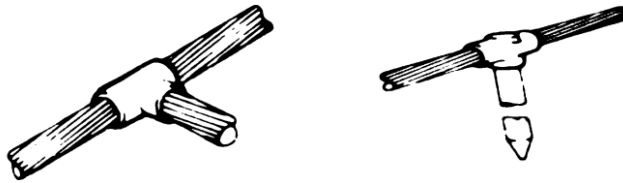


Fig. 2.16 Conexiones Exotérmica.

2.3.3 Naturaleza de las corrientes a tierra.

Las corrientes telúricas o de tierra son las corrientes eléctricas que se propagan a través de la tierra; pueden ser distinguidas según su naturaleza eléctrica como sigue:

- Estacionarias de corriente continua.
- Casi estacionarias o alternas lentas regularmente entre 50 y 60 Hz.
- Alternas rápidas o de alta frecuencia normalmente utilizada en las telecomunicaciones.
- Corrientes que se propagan como ondas electromagnéticas de impulso que son las corrientes de rayo.

2.3.3.1 Orígenes de las corrientes a tierra.

Las corrientes a tierra pueden ser causadas por fenómenos naturales, o bien, por el funcionamiento de ciertos sistemas eléctricos creados por el hombre. Dentro de las primeras, se tiene por ejemplo, a las corrientes que son originadas por campos variables en el tiempo, las causadas por fenómenos meteorológicos transitorios, así como las excitadas de manera

natural dentro de la tierra. Debido a las oscilaciones en el tiempo del campo magnético de la tierra, se inducen en su masa corrientes parásitas a escala global. El campo magnético estacionario de la tierra provoca en las corrientes marinas y otras corrientes eléctricas unipolares por inducción. Los fenómenos eléctricos transitorios entre la atmósfera y la masa de tierra originan el establecimiento de corrientes eléctricas entre ellos, lo que se manifiesta por medio del rayo durante la tormenta.

En los límites entre materiales químicamente diferentes se crean campos eléctricos naturales que originan corrientes telúricas, tanto en la masa de la tierra como en corrientes de agua, en la superficie, así como en la desembocadura de un río al mar al mezclarse el agua dulce con la salada; y aun, diferencias de temperatura dentro de la masa de la tierra ocasionan corrientes de calor, que frecuentemente van acompañadas del transporte de electricidad.

Dentro de los sistemas creados por el hombre, en ciertos casos, por razones de operación, y en otros por circunstancias accidentales, se derivan corrientes eléctricas hacia el suelo (superficie de la tierra considerada como soporte sobre el cual se mueven los seres vivos o se asientan las cosas), o bien, se utiliza como polo eléctrico. Ejemplos de caso de operación son los sistemas de transporte electrificado, tanto en corriente continua, como en corriente alterna.

Dentro de los casos accidentales se puede mencionar al que se origina debido a un defecto del aislamiento en los medios eléctricos de servicio, en los sistemas industriales o en las líneas aéreas de transporte de electricidad, pero también en los no menos importantes sistemas de distribución de energía eléctrica a los diversos usuarios y dentro de sus propias instalaciones.

Por otro lado, la caída de rayos sobre líneas aéreas y otra clase de instalaciones eléctricas originan la derivación de corrientes de impulso de elevada magnitud.

2.3.3.2 Importancia y trascendencia de las corrientes a tierra.

El hecho de que la tierra conduzca corriente eléctrica es de suma importancia para los sistemas técnicos que el hombre construye, ya que participa de diversas maneras en el proceso central del sistema particular. Sin embargo, los efectos eléctricos, magnéticos, térmicos y fisiológicos que se originan durante el proceso del transporte y circulación de la

corriente dentro de la tierra son también trascendentales, repercuten en la eficiencia y economía del sistema técnico en cuestión, así como en aspectos de seguridad para los seres vivos.

El valor de las intensidades de corriente que se traspasan a la tierra puede llegar a varias decenas de kA; además, no se puede conocer de antemano la magnitud de la corriente ni el sitio exacto donde se sucederá el impacto del rayo. En principio toda clase de estructuras, en particular las metálicas de gran altura, son sitios muy probables de atracción para los rayos.

En la práctica se trata de utilizar varias técnicas que provoquen la descarga en ciertos lugares, en donde se puede controlar en cierta medida sus efectos, los cuales son de naturaleza eléctrica, magnética y térmica. Éstos producen altos voltajes que pueden llegar a dañar a las personas que se encuentren en el sitio del impacto o en su proximidad. De acuerdo con el estado actual de las investigaciones en este campo tecnológico, la medida más efectiva sigue siendo contar con una puesta a tierra eficiente.

Dentro del ámbito de las corrientes de tierra artificiales, el campo tecnológico de las líneas aéreas de transporte de electricidad es uno de los más trascendentales. Por ejemplo, en el caso de transporte por medio de corriente continua en altos voltajes se pueden usar dos opciones fundamentales:

- Utilizar un conductor metálico para el circuito de ida de la corriente, y para el circuito de retorno de la corriente, usar la tierra.
- Utilizar dos conductores metálicos en la operación normal y, en caso de una falla de aislamiento en una de las vías, utilizar la tierra como circuito de retomo de la corriente, conduciéndose entonces, por supuesto, solo la mitad de la potencia.

En los sistemas modernos de suministro de energía eléctrica en corriente alterna, tanto en alta tensión como en baja tensión, una falla de aislamiento origina la conexión a tierra de cuando menos uno de los conductores activos, dando por resultado el traspaso de la corriente de defecto a tierra, que servirá entonces como circuito de retorno hacia las fuentes de la misma, la corriente de retomo puede llegar a alcanzar magnitudes muy elevadas, en particular cuando se trata de redes con el punto estrella puesto a tierra directa o indirectamente. Tal hecho causará disturbios en la distribución del potencial entre las fases del sistema y a toda la

operación de las líneas, originando la salida del servicio de las mismas. En esta clase de evento sí se puede calcular de antemano la magnitud de la intensidad de la corriente que circulará hacia la tierra.

2.3.3.3 Efectos Fisiológicos de las Corrientes a Tierra

Al circular la corriente de tierra por los electrodos se originan entre ellos y en la tierra que los rodea fenómenos de naturaleza eléctrica, magnética y térmica. Así por ejemplo, desde el punto de vista de seguridad para las personas, el potencial de electrodo y su distribución sobre el terreno son el problema central por atender, ya que se manifiesta como voltajes de contacto y de paso; tales tensiones no solo les pueden afectar a su salud, sino hasta ocasionarles la muerte. Se tienen ya determinados valores de grado de peligrosidad de la corriente sobre el cuerpo humano, es decir, los valores de corriente y de voltaje que son peligrosos para él, tales magnitudes están ya normalizadas y sirven de base para el diseño de los sistemas de puesta a tierra.

2.3.3.4 Problemas Básicos de la Red de Tierras

Durante una falla, el flujo de corrientes a tierra produce gradientes de tensión dentro y alrededor de la misma, para una malla de tierra simple, rectangular, en un terreno homogéneo.

La resistencia que ofrece la tierra al paso de la corriente eleva el potencial eléctrico del sistema y a menos que se tomen precauciones adecuadas en el diseño, los gradientes en toda la superficie pueden resultar tan grandes en condiciones adversas que ponen en peligro a cualquiera que camine por ahí. Pueden resultar además diferencias de tensión peligrosas durante alguna falla entre estructuras o equipos conectados a tierra. Generalmente la geometría de un sistema de tierras es más compleja que la mostrada en la figura y por ello no resulta fácil estimarlas, ya que tampoco pueden determinarse en forma exhaustiva las condiciones del subsuelo.

Debe hacerse hincapié en que contrariamente a ideas generalizadas que a veces se expresan, una resistencia baja a tierra no es en sí una garantía de seguridad. No existe una relación simple entre la resistencia del sistema de tierras en conjunto y el potencial máximo del choque que pueda sufrirse. Una estación de baja resistencia a tierra puede en ocasiones hacerse peligrosa y, por lo contrario estaciones de alta resistencia pueden hacerse seguras por medio de diseños elaborados con cuidado.

La idea generalizada de que puede tocarse todo objeto conectado a tierra es falsa y resulta evidente que ella ha sido causa de muchos accidentes.

Por razones económicas se justifica un sistema de transmisión eficazmente aterrizado, lo que requiere de una conexión a tierra adecuada. Debido a que los sistemas de tierra quedan enterrados fuera de la vista, podrían descuidarse durante su vida útil. Es por esto que uno como ingeniero deberá estipular una red de tierras que cumpla con características mecánicas, eléctricas y químicas para que puedan durar no menos de 30 años.

2.3.3.5 Ventajas de un Sistema Eficazmente Aterrizado

- Costo mínimo de los equipos.
- Mínima radio interferencia (RIF).
- Facilidad de localizar fallas.
- Aplicación satisfactoria de relevadores.
- Niveles mínimos de aislamiento (NBAI) y de estabilidad.

2.3.3.6 Problemas Típicos que se Encuentran en el Diseño de un Sistema de Tierra

Valor de Resistencia de tierra alto.

- Altos gradientes de potencial en la superficie de la tierra.
- Requerimientos de coordinación de protecciones.
- Tensiones mayores de inducción electromagnética.
- Difícil mantenimiento de la instalación por estar enterrada.

Aspectos sociales y los sistemas de seguridad en la técnica de la energía eléctrica

Dentro de este sector, es válido establecer que por medio de las normas, prescripciones, reglamentos, etcétera, se pretende:

- Proteger la vida de personas y animales útiles
- Conseguir la suficiente seguridad de servicio en la producción, transporte y utilización de la energía eléctrica.
- Evitar perturbaciones en los equipos que sirven como medios de seguridad en instalaciones.

Consecuentemente, se declara que: " cuando las instalaciones eléctricas y los medios de servicios eléctricos son planeados y construidos sin tomar en consideración los mejores conocimientos técnicos disponibles, normas, reglamentos, prescripciones, lineamientos y en fin las reglas reconocidas en la técnica y además cuando aquellos no son aplicados ni utilizados correctamente, se pueden presentar riesgos y peligros para las personas y/o animales útiles, medios de servicio, edificaciones, plantas vegetales y hasta para el ambiente".

Debe aceptarse que muchos accidentes mortales, la destrucción de medios eléctricos de servicio, así como la perturbación del grado de fiabilidad en la producción, transporte, almacenamiento y utilización de la energía eléctrica, puede evitarse si se concibe y adopta un sistema de seguridad, el cual estará constituido por conocimientos de diversa naturaleza:

- Científicos y tecnológicos (electricidad, mecánica, electrofisiología.
- Economía.
- Sociología y psicología.
- Culturales.
- Normalización.

Cuando se trata en particular de la seguridad de los medios de servicios eléctricos, se utilizan las técnicas:

- la protección con relevadores eléctricos de alta tensión.
- protección contra sobre tensiones, coordinación de aislamiento.
- la protección contra rayos (interceptores de rayos, conductores de tierra o de blindaje, la puesta a tierra.

De la supervisión y del diagnóstico anticipado. Las primeras bases en conocimiento o teorías tecnológicas sustantivas; las segundas en cambio, más en teorías operativas y de naturaleza empírica. En cuanto a la perturbación del grado de seguridad del servicio (disponibilidad, continuidad, etc.), el medio fundamental lo constituye la técnica de fiabilidad, la cual está sustentada, por una parte, en teorías fenomenológicas físico-químicas, en teorías de la electrotecnia y de la mecánica técnica y, por otra parte, en teorías formales de matemáticas (teoría de la probabilidad).

La seguridad de las personas y/o animales útiles se persigue, en principio, por medio de la puesta a tierra; sin embargo, cuando con ella no se puede garantizar el grado de seguridad requerido, se complementa o se aplican ciertas medidas adicionales directas o indirectas de protección, según se trate de una instalación de alta o baja tensión. Así en el caso de instalaciones de alta tensión, en caso necesario se puede utilizar, por ejemplo las siguientes medidas adicionales indirectas:

- Aumentar la resistividad del suelo en las zonas peligrosas, agregando una capa de grava suelta (ya con una capa de 0.15 m se consigue una suficiente seguridad).
- Uso de zapatos aislantes, con los cuales en estado seco se puede, teóricamente alcanzar una resistencia infinita del cuerpo, pero aún húmedos ofrecen una aceptada protección.
- Utilización de guantes aislantes (secos y en buen estado) para el caso de contacto por medio de las manos.
- La delimitación de las zonas peligrosas (donde se presenten voltajes de contacto y/o de paso peligrosos para los seres vivos).
- Y, aun aplicando alguna medida de protección de la técnica de seguridad demostrativa, por ejemplo avisos de peligro, llamadas de atención, recomendaciones, entre otras.

Si bien todas las medidas antes citadas utiliza la puesta a tierra, sólo en la medida de puesta a tierra de protección juega el papel principal; en las restantes medidas, tiene un papel secundario. Así cuando los requisitos de puesta a tierra de protección (generalmente se quiere un valor muy pequeño de las resistencias de propagación del electrodo) no se pueden conseguir en el sitio, se puede utilizar alguna otra de las siguientes medidas, usualmente junto con la puesta a tierra de servicio (por ejemplo la puesta a tierra del neutro del transformador).

En cualquier forma, se trate de una instalación de alta o baja tensión, las anteriores medidas de seguridad no solo se deben aplicar sino además, integrar para formar un sistema de protección total, es decir tanto para los medios eléctricos de servicio y otros bienes como para las personas y/o animales útiles. Pero finalmente, el sistema de protección total debe garantizar la seguridad de los seres vivos, y ello no únicamente de los que se encuentren dentro de su ámbito, sino también de los que estén fuera, pero en su cercanía. Por tanto, el

concepto moderado de sistema de seguridad en una instalación de energía eléctrica de gran tamaño, involucra los siguientes aspectos:

- El análisis de peligros, defectos y fallas.
- El manejo del punto estrella del transformador de potencia en las redes trifásicas de corriente alterna.
- Los disturbios y análisis de magnitudes de corto circuito.
- La puesta a tierra, la conexión al neutro y otras medidas de protección adicionales.
- La técnica de la protección con relevadores para los medios de servicio.
- La protección contra sobre voltaje y la coordinación de aislamiento.
- La técnica de la protección contra rayos.
- La protección de reserva y contra maniobras erróneas.
- La protección contra incendio y explosión.
- La técnica de la fiabilidad.
- La técnica de supervisión y el diagnóstico anticipado.
- La técnica de la seguridad en el trabajo.

Dentro de tal sistema total de seguridad, cada uno de los anteriores conceptos puede ser, en un momento dado, elemento integrante o subsistema entero de seguridad.

En consecuencia, un sistema de puesta a tierra de protección es un subsistema de un sistema de seguridad o de protección completo. Así, por ejemplo, en particular en los sistemas de suministro de energía eléctrica con el punto estrella puesto a tierra directamente o indirectamente(en los cuales se traspasan a tierra, en caso de falla corrientes de alta intensidad, durante el diseño de una instalación de puesta a tierra de estaciones y de subestaciones, se debe aplicar un enfoque de sistema, con el propósito de lograr la solución más aproximada a la óptima (desde los puntos técnico, social y económico); para tal objeto se deberá sistematizar la técnica de la protección con relevadores para los medios eléctricos de servicio, adecuado entonces a los tiempos de aperturas de los interruptores de potencia del circuito en cuestión, a los valores de los voltajes de contacto y/o de paso máximos admisibles para las personas y/o animales útiles (los cuales deben ser diferentes entre ellos).

2.4 Medición de la Resistividad del Terreno de una Torre de una línea de Transmisión

Las redes de tierra tienen como finalidad lo siguiente:

- Proteger a las Líneas de Alta Tensión de sobretensiones ocasionadas por descargas atmosféricas o transitorias.
- Obtener un sistema relativamente estable, con un mínimo de sobretensiones transitorias.
- Aumento de la confiabilidad de los esquemas de protección del sistema por fallas a tierra.
- Disminución de ruido en las comunicaciones.

De acuerdo a la finalidad de las redes de tierra, éstas deberán permitir el paso de las corrientes a tierra con un mínimo de resistencia, según estudio Técnico-Económico, se construirán por lo tanto, formando una malla de cables desnudos enterrados conectados entre sí y a los electrodos de tierra mediante conectores apropiados.

Otra característica importante, es la sección de conductor suficiente para soportar las corrientes de falla o de descarga atmosférica (si se requiere consultar la Norma NRF-011-CFE-2004).

2.4.1 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).

La resistividad del suelo es extremadamente variable de un lugar a otro y para un sitio dado, puede variar vertical y horizontalmente.

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, etc.

Recomendamos que al efectuar estas pruebas, se hagan perfectamente en épocas del año, cuando la sequía sea más intensa y así obtener valores de resistividad críticos.

Resistividad promedio de la tierra como se muestra en la tabla 1.

TIPO DE TIERRA	RESISTIVIDAD EN OHM-METRO (Ω/m)
Suelo orgánico mojado	10
Suelo húmedo	100
Suelo seco	1000
Roca	Tabla. 2.2 Resistividad del terreno.

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 contraantena radiales, Varilla profundas, Electrodo de Bentonita; Contraantenas continuas (Contra pesos), modificar la composición química del terreno, o en todo caso y de ser necesario, hacer una combinación de estos métodos.

2.4.2 Medición de la Resistividad del Suelo y Resistencia Eléctrica en Líneas de Alta Tensión en Construcción

Las mediciones de resistividad del suelo y de resistencia eléctrica de la red de tierra se deben realizar en época de sequía debido a que son las condiciones más críticas.

2.4.3 Medición de la Resistividad del Suelo en Líneas de Alta Tensión para el Diseño de la Red de Tierra

Una vez determinada la posición de las estructuras y por consecuencia lógica las cimentaciones de las mismas, se procede a ejecutar la medición de la resistividad del suelo, siguiendo el método de los cuatro electrodos o de Wenner.

Para estructuras autosoportadas se deben hacer a partir del centro de la base de la torre en diagonal respecto al sentido de la línea, de acuerdo al “Arreglo A” representado en la figura 1, considerando la medición hacia fuera de las patas 1 y 3 o al “Arreglo B” de la misma figura, que involucra las patas 2 y 4.

La selección del “Arreglo A” o “Arreglo B” para las mediciones debe ser en función de las mejores condiciones o facilidades que ofrezca el terreno para el indicado de los electrodos verticales.

Para otro tipo de estructuras (poste Tipo H, poste de madera, poste troncocónico) el procedimiento debe ser a partir del centro de la base siguiendo la misma metodología (en diagonal). En zonas urbanas las mediciones se harán a partir del centro de la base en el sentido de la instalación de la red de tierra.

En cualquiera de los arreglos, se deben realizar siete mediciones en cada dirección para dar un total de 14 mediciones. La primera lectura se debe hacer con una separación entre electrodos de 1,6 m, aumentándose la misma en incrementos de 1,6 m, hasta alcanzar un total de 2 m. Los valores obtenidos se deben anotar en el formato 1 de esta especificación y los valores representativos de la resistividad del suelo para el diseño de la red de tierra son responsabilidad del diseñador.

Las mediciones se deben realizar manteniendo el electrodo C1 instalado en el centro de la estructura, por lo cual sólo variarán de posición los electrodos P1, P2 y C2.

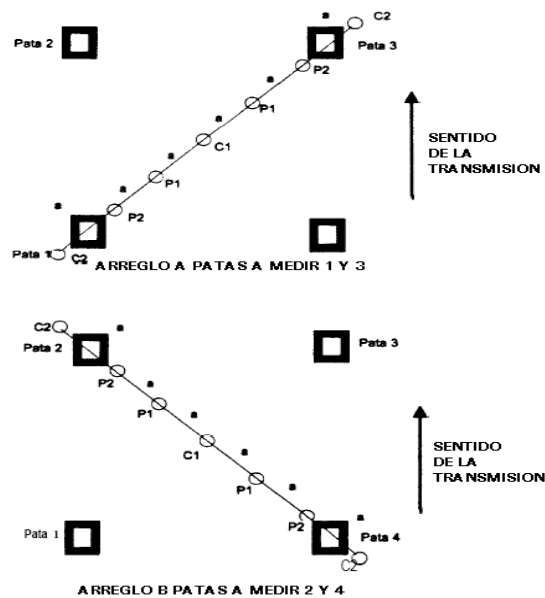


Fig. 2.1.7 Arreglo para la Medición de la resistividad del suelo para torres de transmisión

Para la medición de la resistencia eléctrica de la red de tierra, se debe utilizar el método de caída de potencial y su valor máximo aceptable es de 10 Ω.

Este método se basa en la inyección de una corriente de prueba en el electrodo bajo análisis (red de tierra). Se toman mediciones de la tensión a diferentes distancias entre el electrodo bajo análisis E y el electrodo auxiliar de potencial P, el valor representativo de la resistencia se tendrá cuando la diferencia entre dos o tres mediciones sea despreciable (véase figura 2.18).

El procedimiento para la realización de las mediciones con el método de caída de potencial se debe realizar con el hilo de guarda desconectado y con un medidor de resistencia de baja frecuencia (aproximadamente 120 a 150 Hz) y que la corriente de inyección sea mayor a 1 mA, de acuerdo a lo siguiente (para los siguientes incisos consultar la especificación CFE-00JL0-28):

- a) Primero se selecciona la dirección en que se realizará la medición y ésta, de preferencia, que sea perpendicular a la línea aérea, como se ilustra en la figura 2.19.
- b) Instalar el electrodo auxiliar de corriente C, y su cable asociado en la dirección seleccionada a una distancia de 75 m del electrodo E.
- c) Colocar el electrodo auxiliar de potencial P y su cable asociado en la dirección al electrodo de corriente, a una distancia de 39 m del electrodo E como lo muestra la figura 2.18.
- d) Se realiza la primera medición de la resistencia del electrodo E, conectando el medidor de resistencia de acuerdo a la figura 2 y a las instrucciones del equipo de medición empleado.
- e) La segunda medición se realiza instalando el electrodo P, a 46,5 m del electrodo E y finalmente la tercera medición se efectúa instalando el electrodo P, a 54 m del electrodo E.
- f) Las tres mediciones corresponden al 52,62 y 72 % de la distancia entre los electrodos E y C respectivamente.
- g) Se debe verificar que las diferencias entre los valores medidos al 52 y 72 % no sean mayores al 5 % con respecto al valor medido a 62 %.
- h) Si alguna de las diferencias es mayor al 5 %.
- i) El valor representativo de la resistencia eléctrica de la red de tierra se considerará el de la lectura realizada cuando el electrodo de potencial se encuentre a una distancia del 62 % de la distancia entre los electrodos E y C.
- j) Si el valor de la resistencia eléctrica de la red de tierra es mayor a 10 Ω debe corregirse.

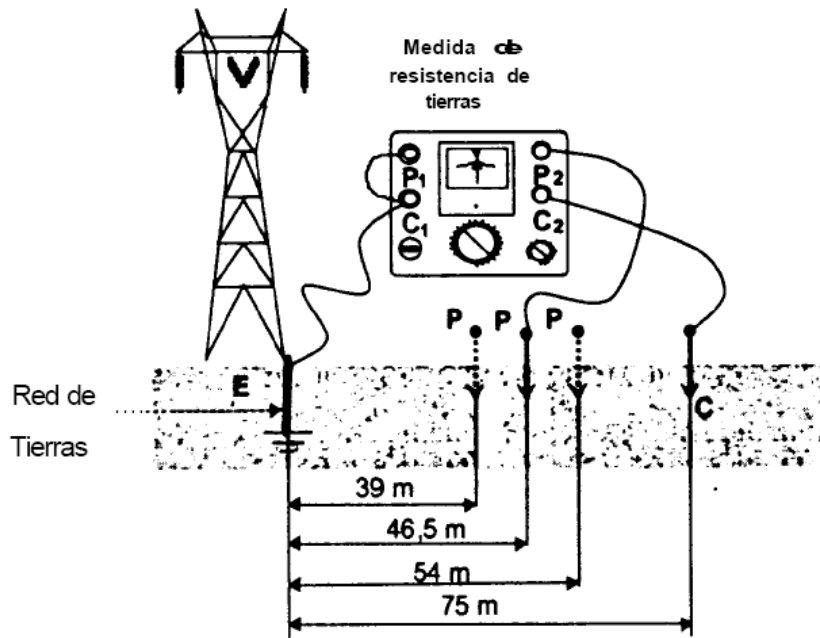


Fig. 2.1.8 Medición de resistencia para Red de Tierras para Líneas de Alta Tensión en Construcción.

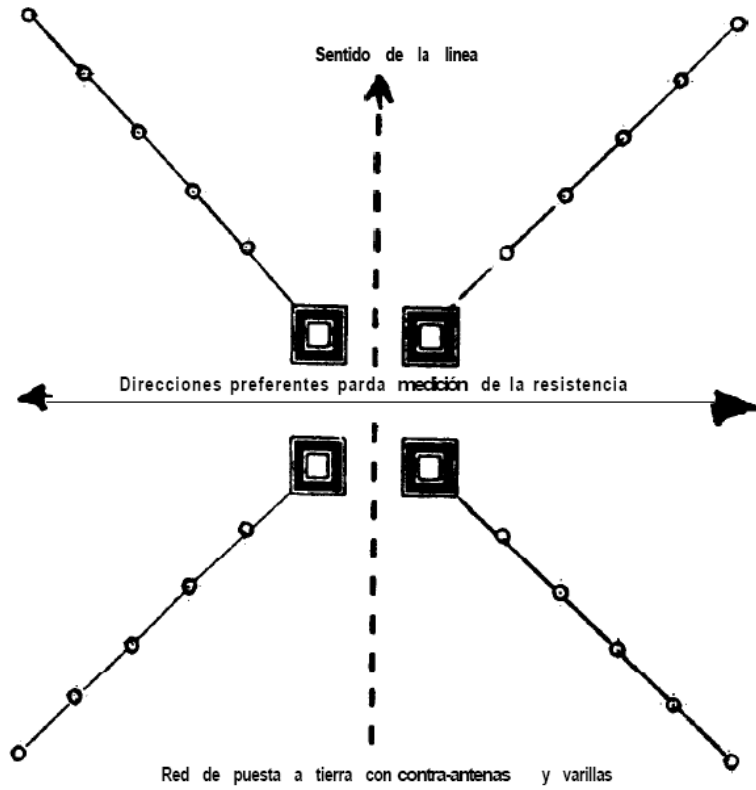


Fig. 2.1.9 *Direcciones preferentes para la medición de la resistencia de la red de tierra.*

2.4.5 Método de Wenner

Para medir la resistividad del suelo, se debe utilizar el método de Wenner ilustrado a continuación en la figura

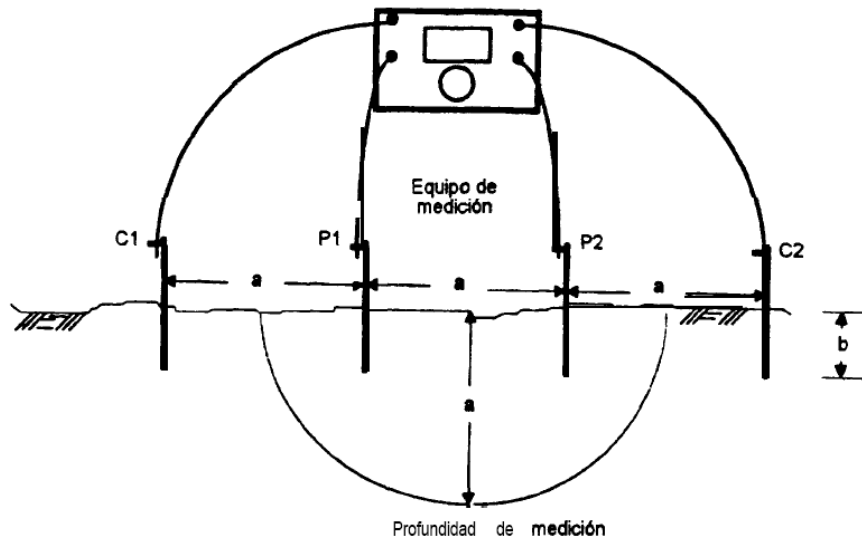


Fig. 2.2 Medición de la resistividad por el método de Wenner.

Se debe medir la resistividad del suelo colocando el instrumento de medición en el centro de la estructura (mojonera), y los electrodos verticales se deben colocar paralelos al sentido de la Línea de Alta Tensión, con una separación de 1,6 m para la primera medición y 3,2 m para la segunda medición (véase figura 2.20.) Cuando no sea práctico colocar los electrodos verticales paralelos al sentido de la Línea de Alta Tensión, la medición se puede realizar en sentido perpendicular.

Los valores obtenidos se deben asentar en el formato SYL-06 del Capítulo 10 del procedimiento.

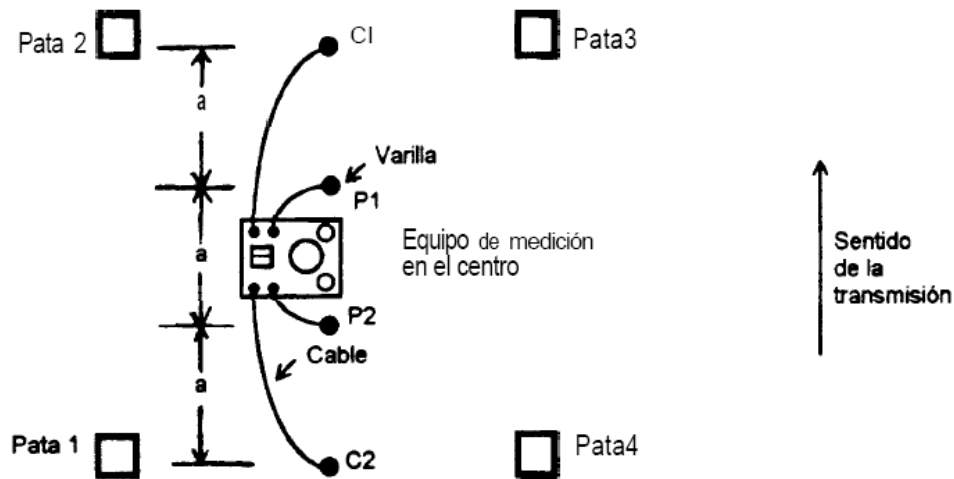


Fig. 2.2.1 Medición de la resistividad del suelo (vista plana).

2.4.6 Medición de la Resistencia Eléctrica de la Red de Tierra

Se debe realizar una sola medición de resistencia eléctrica por estructura. La distancia de instalación de los electrodos verticales de corriente C y de potencial P, deben ser de 75 m y 46,5 m respectivamente.

La dirección de la medición se debe realizar de preferencia perpendicular a la línea en cualquier sentido, de no poder realizarla en esa dirección, se puede realizar longitudinalmente a la línea y, en el último de los casos en forma diagonal, siempre y cuando no existan contra-antenas instaladas. En el caso de estructuras de deflexión, la medición se debe hacer en la dirección de la cruceta (véase figura 2.2.2).

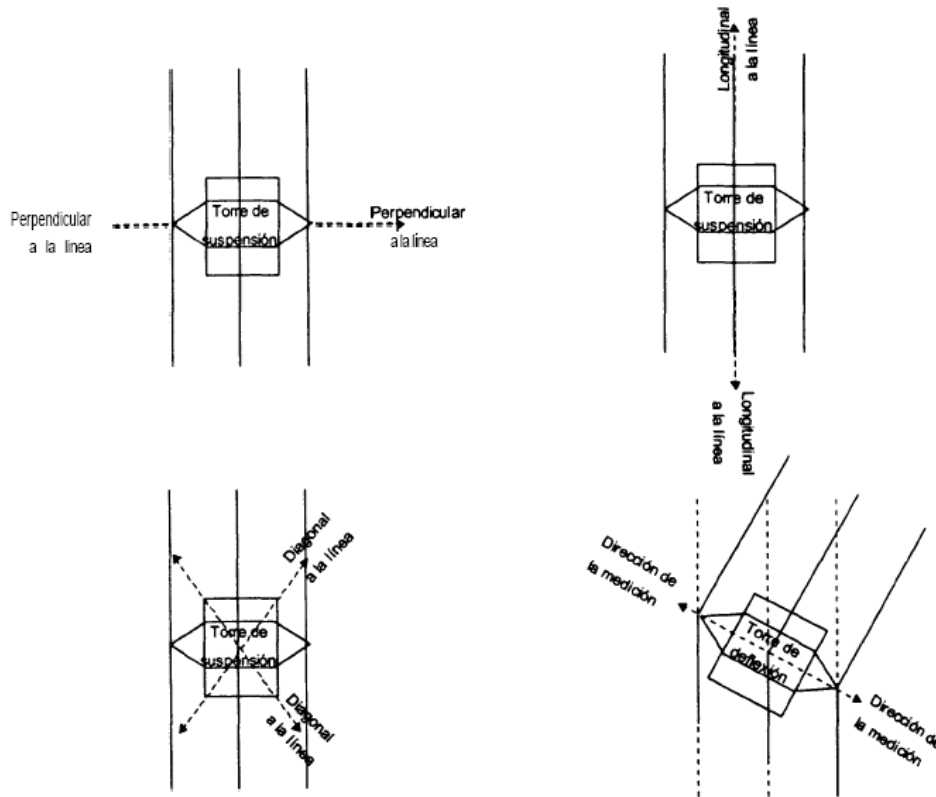


Fig. 2.2.2 Dirección de la medición para las torres.

La red de tierra es adecuada si la resistencia eléctrica a tierra es menor o igual a 10 Ω. En caso contrario se debe verificar y/o mejorar.

Para el caso de estructuras que estén ubicadas en zonas de alta incidencia de descargas atmosféricas o en suelos con resistividad mayor de 300 Ω.m, se debe realizar la medición de resistencia eléctrica a tierra de acuerdo al inciso 6.5.

Medición de la Resistencia con Resistividad del Suelo Menor de 100 Ω.m

Por lo general cuando la resistividad del suelo es menor de 100 Ω.m, el valor de la resistencia eléctrica de la red de tierra es menor de 10 Ω, por esta razón se mide la resistencia con equipo de baja frecuencia e hilo de guarda conectado y si ésta es menor de 5 Ω, se anota en el formato

SYL-06 del Capítulo 10 del procedimiento, si la resistencia eléctrica es mayor a 5Ω , se identifica el tipo de cimentación de la estructura y si ésta es de concreto, se verifica que las conexiones a tierra se encuentren instaladas, de lo contrario se corrigen y se vuelve a medir la resistencia, la cual seguramente dará un valor menor de 5Ω , en caso contrario, lo más probable es que la medición se realizó en forma incorrecta y tendrá que repetirse.

Si la resistencia resulta mayor de 5Ω , se desconecta el hilo de guarda y se vuelve a medir, si el valor es mayor de 10Ω , se debe mejorar la red de tierra.

En caso de utilizar equipo de alta frecuencia, la medición se realiza sin desconectar el hilo de guarda y si la resistencia es menor de 10Ω este valor se anota en el formato SYL-06 del Capítulo 10 del procedimiento, en caso de que el valor sea mayor a 10Ω , se debe mejorar la red de tierra.

Medición de resistencia con resistividad del suelo mayor a $100 \Omega\cdot m$

La medición de resistencia con resistividad mayor a $100 \Omega\cdot m$, se puede realizar utilizando equipo de alta frecuencia (25 kHz) o de baja frecuencia.

La medición de la resistencia con equipo de baja frecuencia, se realiza con el hilo de guarda conectado a la estructura, y si el valor es menor de 3Ω , se anota en el formato SYL-06 del Capítulo 10 del procedimiento.

Si la resistencia medida es mayor de 3Ω , tendrá que desconectarse el hilo de guarda y realizar la medición nuevamente y en el caso de que se obtenga un valor menor de 10Ω , se anotará en el formato SYL-06 del Capítulo 10 del procedimiento. En caso contrario (si el valor obtenido es mayor de 10Ω), se anotará en el formato SYL-06 del Capítulo 10 del procedimiento y posteriormente se debe corregir la red de tierra.

2.4.7 Mejoramiento de la red de tierra al pie de la torre.

Como se mencionó anteriormente, el proceso de flameo inverso depende de varios factores, pero el principal es la resistencia al pie de la torre, la cual puede ser diseñada para obtener un índice de fallas por flameos inversos.

Cuando se tiene una descarga atmosférica en el hilo de guarda se generan ondas transitorias de corriente y tensión que viajan hacia ambos lados del conductor. Al llegar la onda a un punto de cambio de impedancia, como lo es una torre, se producen ondas reflejadas y transmitidas en la punta de la torre; estas ondas crean diferencias de potencial en los aislamientos entre los conductores de tierra y conductores de fase, en diferentes puntos de la

línea, estos puntos pueden ser a lo largo del claro o en el aislamiento. En el caso de que este potencial exceda los potenciales del aislamiento, se producirán flameos entre las estructuras y los conductores de fase, estos flameos se denominan flameos inversos.

Los flameos inversos en las torres son los más frecuentes y en general es influenciado por los siguientes factores.

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

Las funciones básicas de un sistema de conexión a tierra se pueden resumir en:

1) Proveer de una baja resistencia de dispersión de la corriente a tierra para:

- Evitar daños por sobre tensiones que se presenten por descargas atmosféricas o maniobras.
- La descarga a tierra de dispositivos de protección (Contra sobre tensiones atmosféricas o internas).
- Camino a tierra de corrientes de falla.
- Conectar los sistemas que usen neutro común aterrizado.
- Asegurar que las partes metálicas de los sistemas o equipos se encuentren al mismo potencial de tierra. Esto para protección del personal.

2) Disipar y resistir repetidamente las corrientes de falla y de las descargas atmosféricas.

Las características de los sistemas de conexión a tierra deben ser:

- a) Tener una resistencia a la corrosión en suelos de variada composición química, de manera que asegure un comportamiento continuo durante la operación del equipo a proteger.
- b) Tener buenas propiedades de resistencia mecánica.
- c) El diseño de la red de tierras debe ser económico.

Debido a que el valor de resistencia de conexión a tierra se ve afectado por las características del terreno, arreglos de las varillas de tierra y las conexiones entre ellas, se han desarrollado varias metodologías para aplicar según las características en cuestión.

De los métodos empleados para reducir o mejorar los valores de conexión a tierra, podemos listar los más usuales:

1) Electrodo profundo. Cuando el terreno es penetrable se puede aplicar este método ya que a mayor profundidad se tienen mejores valores de resistividad del terreno, específicamente donde se tienen los mantos freáticos no muy profundos. Sin embargo debido a las longitudes de electrodos y los métodos para enterrar las varillas, este método poco práctico y antieconómico.

2) Contraantenas. En terrenos donde no es posible la penetración de varillas teniéndose un manto delgado de suelo sobre subsuelo de roca, se recomienda el uso de conductores enterrados a baja profundidad a lo largo de zanjas construidas específicamente para contener el conductor.

3) Electrodos múltiples. Cuando se tienen valores de la resistividad del terreno de las capas superiores más bajas que la de las capas más profundas o en casos donde no se puedan obtener las profundidades adecuadas de las varillas de tierra, se recomienda el uso de dos o más electrodos.

4) Procedimientos artificiales. Este método se aplica cuando con los anteriores no se obtienen buenos resultados y los procedimientos en este método son mediante la aplicación de: Sales simples, Coque, Gel y bentonita; estos se aplican en una zanja que rodea al electrodo con una profundidad promedio de 30 cm sin llegar a tener contacto directo con el electrodo ya que en el caso de las sales y el coque por ejemplo se tienen la desventaja de ser muy corrosivos y disminuyen la vida del electrodo de tierra.

De los métodos anteriores, los más aplicados en líneas de transmisión son:

a) El uso de varillas de conexión de tierra de 19 mm de diámetro y 3 m de longitud, enterradas verticalmente, interconectadas con longitudes cortas de conductor y unidas a las patas de las estructuras.

b) El uso de contra antenas, las cuales consisten de uno o varios conductores enterrados horizontalmente en zanjas de 30 cm de profundidad y unidos a las patas de la estructura (ver

la tabla siguiente); este último es el más usado en casos en que la resistividad del terreno sea mayor a 200 Ω -m (ver en la tabla 1 sección 2.4.1).

resistividad del terreno (Ω -m)	Configuración
< 300	Dos contra-antenas de 30 m de longitud en patas opuestas.
300 – 500	Dos contra-antenas de 45 m de longitud en patas opuestas.
500 – 1000	Cuatro contra-antenas de 30 m de longitud.
1000 <	Cuatro contra-antenas de 50 m de longitud.

Tabla. 2.3 Configuraciones de contra-antenas para diferentes resistividades de terreno.

Tabla. 2.4 Resistividad típica en diferentes tipos de suelo

Tipo de suelo	Resistividad (Ω -m)
Suelo de superficie, greda, etc.	1 – 50
Arcilla	2 – 100
Arena y grava	50 - 1,000
Piedra caliza de superficie	100 – 10,000
Piedra caliza	5 – 4,000
Esquisto o pizarra	5 – 100
Piedra arenisca	20 – 2,000
Granito, basalto	1,000

Tabla. 2.4.1 Resistencia del suelo.

La red de tierra será adecuada cuando su resistencia eléctrica sea menor o igual a 10 Ω , en caso contrario, se deberán verificar los procedimientos de medición y/o mejorarse.

2.4.7.1 Reducción de Valores de Resistencia de Conexión a Tierra en Torres de Transmisión

Debido a que el valor de resistencia de conexión a tierra se ve afectado por las características del terreno, arreglos de las varillas de tierra y las conexiones entre ellas, los métodos de mejoramiento de los valores de resistencias de conexión a tierra en torres de transmisión hacen uso de los puntos mencionados con anterioridad. Para las características del terreno se

usan métodos para disminuir la resistividad del terreno por medio de sales o productos químicos.

Con los arreglos de varillas a tierra se recomiendan tanto número como disposición de éstas para disminuir la resistencia de conexión para ciertas resistividades de terreno. Y por último, se recomiendan tipos de uniones para asegurar que las conexiones no pierdan sus características.

Métodos de Mejoramiento

A continuación se enumeran algunos de los métodos usados para reducir o mejorar los valores de conexiones a tierra:

Electrodos Profundos

Cuando el terreno es penetrable se puede usar este método para mejorar el valor de resistencia de tierra. A mayor profundidad se tienen mejores valores de resistividad de terreno, especialmente en terrenos donde se tienen mantos freáticos no muy profundos. Debido a las longitudes de electrodos y los métodos para enterrar las varillas, este método puede resultar antieconómico y muy poco práctico.

Electrodos Múltiples en Paralelo

Cuando se tienen valores de la resistividad del terreno de las capas superiores más baja que la de las capas profundas o en casos donde no se pueden obtener las profundidades adecuadas de las varillas de tierra, se recomienda el uso de dos o más electrodos en paralelo, ya que como es sabido, un arreglo en paralelo reduce la resistencia total equivalente del sistema.

Contra antenas

En terrenos donde no es posible la penetración de varillas teniéndose un manto delgado de suelo sobre subsuelo de roca, se recomienda el uso de conductores enterrados a baja profundidad a lo largo de zanjas construidas específicamente para contener el conductor llamadas contra antenas. Este arreglo se debe realizar en forma horizontal y en una sola dirección.

Hormigón Armado

El hormigón armado puede considerarse como electrodo metálico inmerso en un medio razonablemente homogéneo (el hormigón), cuya resistividad está en el orden de los 30 Ω -m. El hormigón, a su vez está inmerso en el terreno, cuya resistividad puede variar desde uno

hasta mil ohms por metro. La relación de resistividades de hormigón y terreno determina la resistencia de dispersión a tierra resultante.

2.4.8 Reducción de la Resistividad del Suelo Mediante Procedimientos Artificiales

En algunos terrenos con alta resistividad, las prácticas de los métodos resumidos anteriormente pueden resultar prácticamente imposibles de aplicar para obtener valores de resistencia de conexión a tierra aceptables. En estos casos puede resultar aceptable el uso de procedimientos para reducir artificialmente la resistividad del terreno que circunda al electrodo de tierra. Los métodos más usados se resumen a continuación.

Agregado de Sales Simples

Un método simple de tratamiento químico de suelos es mediante sales. Esta se dispersa en una zanja alrededor del electrodo de tierra formando un círculo y tapada con tierra, sin llegar a tener contacto directo con el electrodo, como se muestra en la siguiente figura:

El sulfato de magnesio, el sulfato de cobre y la sal común o cloruro de sodio, son sales que pueden utilizarse para este propósito. Una de las desventajas de este método es la degradación que existe durante las lluvias, que drenan la sal a través de la porosidad del suelo y la corrosión que se genera en la varilla

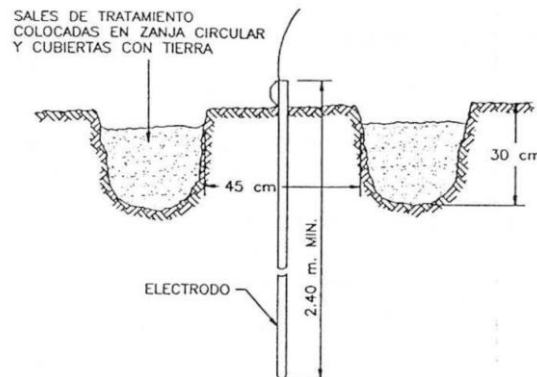


Fig. 2.2.3 Tratamiento de sales simples.

Por la presencia de dichas sales. Por lo que este método no se recomienda.

Agregado de coque:

La resistividad del coque es de aproximadamente $1.3 \Omega\text{-m}$ y además es independiente del contenido de humedad debido pero al colocarse en el terreno se hace dependiente de la humedad debido al resto del terreno. Una de las desventajas del uso del coque y de la sal es su efecto corrosivo, el cual disminuya la vida útil del electrodo de tierra.

Aporte de Sales "Gel"

Este método consiste en irrigar el terreno con dos o más sales combinadas con una solución acuosa acompañada de catalizadores que reaccionan entre sí formando un precipitado en forma de “gel” estable, con una elevada conductividad eléctrica. Esta mezcla es resistente a los ácidos del terreno y es insoluble en agua, lo que le da al método un mayor tiempo de permanencia.

Inyección de bentonita

Este método consiste en el uso de bentonita en grietas naturales formadas alrededor del electrodo de tierra o formando una capa alrededor de este. La bentonita es un mineral de composición compleja, básicamente arcilla de notables características higroscópica, un buen conductor de electricidad y que además protege al electrodo de la corrosión.

Recomendaciones para Diferentes Resistividades del Terreno

Los métodos básicos de conexiones de tierra en líneas de transmisión son:

- El uso de varillas de conexión de tierra de 19 mm de diámetro y 3 m de longitud, enterradas verticalmente, interconectadas con longitudes cortas de conductores y unidas a las patas de las estructuras.
- El uso de contra antenas, las cuales consisten de uno o varios conductores enterrados horizontalmente en zanjas de 30 cm de profundidad y unidos a las patas de la estructura.

Desde el punto de vista práctico el método más usado para reducir el valor de resistencia a tierra es el uso de contra antenas. Estas se recomiendan usar en casos en que la resistividad del terreno sea mayor a 200 Ω -m. Estas se caracterizan por una impedancia inicial entre 150 y 200 Ω (impedancia característica). Su comportamiento al impulso del rayo presenta esta impedancia inicial que disminuye exponencialmente después de un tiempo aproximado a 1 μ s, como se muestra a continuación:

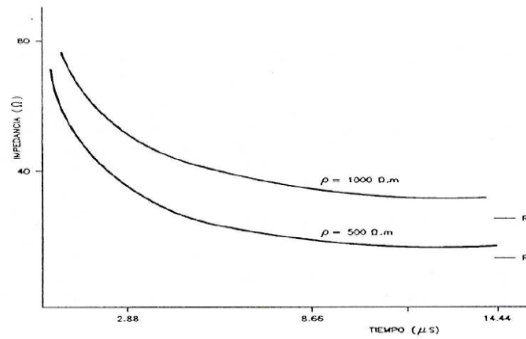


Fig. 2.2.4 Comportamiento de la impedancia característica.

Después de este tiempo la impedancia decrece a valores de la resistencia de conexión a tierra en estado estable. Este comportamiento al impulso de la impedancia nos da las longitudes máximas efectivas para el diseño de contraantenas, por ejemplo, si consideramos una contraantena de 50 m de largo (considerando un tiempo de viaje de la onda de corriente del rayo a 300 m/μs), se tiene que en 1μs la onda viajará 300 m, seis veces la longitud de la contraantena.

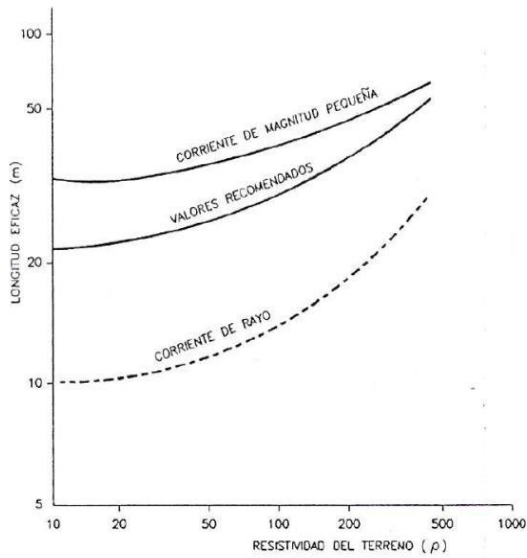


Fig. 2.2.5 Resistividad del terreno

De este comportamiento, la longitud de las contraantenas se puede limitar a valores característicos dependientes de la resistividad del terreno. En la siguiente figura se muestra la relación entre la longitud eficaz de contraantenas y la resistividad del terreno:

La longitud eficaz de contraantenas deberá estar comprendida entre 20 y 70 m. y su multiplicidad entre 2 y 4.

El uso de contraantenas en torres de transmisión se puede resumir con las recomendaciones mostradas en la siguiente tabla y figuras:

Resistividad del Terreno ($\Omega\text{-m}$)	Configuración de la Contraantena
< 300	Dos contraantenas de 30 m de longitud en patas opuestas. (Figura A)
300– 500	Dos contraantenas de 45 m de longitud en patas opuestas. (Figura A)
500 – 1000	Cuatro contraantenas de 30 m de longitud en patas opuestas. (Figura B)
> 1000	Cuatro contraantenas de 50 m de longitud. (Figura B)

Tabla. 2.5 resistividad del terreno

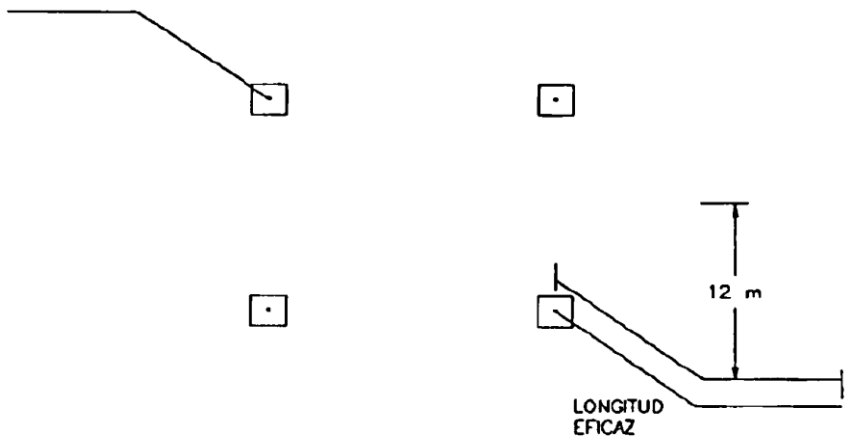


Fig. 2.2.6 Configuración de dos contraantenas.

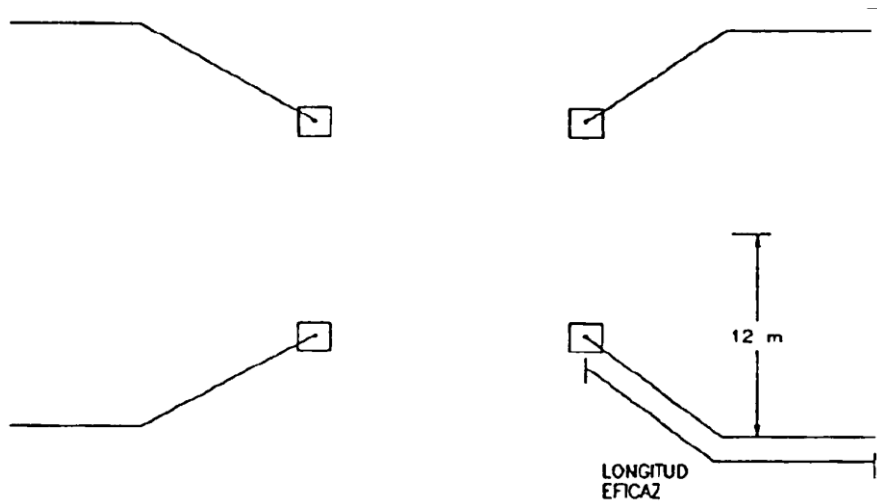


Fig. 2.2.7 Configuración de cuatro

Estas recomendaciones dan un enfoque general de las conexiones de tierra en las torres de transmisión, la solución para cada línea dependerá del nivel de confiabilidad deseado, la variación de la resistividad del terreno a lo largo de la línea y de la densidad de los raios a tierra.

Beneficios de un Sistema de Puesta a Tierra Diseñado Apropriadamente

- Resultados Predecibles.
- Seguridad del Personal mejorada.
- Mejora de la confiabilidad del equipo.
- Protección contra Rayos / Subidas de Tensión – Rendimiento Mejorado del Equipo.
- Menos estrés sobre el equipo y menos errores de funcionamiento.
- Calidad de la Energía Mejorada.
- Cumple los Requerimientos de Garantía de Fabricantes.

Información Requerida

- Requerimientos Especificos de Puesta a Tierra.

- Propósito del Sistema de Puesta a Tierra.
- Información de la Resistencia del Suelo.
- Descripción del Suelo/ Informes Geográficas.
- Diagrama del Sitio.
- Instrucciones Especiales del Cliente/ Especificaciones.
- Configuración de la Acometida de Luz.
- Carreteras de acceso disponibles.
- Gastos Generales / Espacios libres bajo tierra/ Obstrucciones.

Requisitos Estrictos de un Sistema de Puesta a Tierra

- NFPA 70 NEC 25 Ω o dos jabalinas.
- IEEE Estándar 142 Dependiente de Equipo: 2-10-25 Ω .
- IEEE Estándar 1100 Dependiente de Equipo: 5-10 Ω .
- Motorola Estándar R-56 5 Ω objetivo, 10 Ω máximo.
- Emerson DeltaV (control industrial) 3 Ω .
- Torres alta tensión 2-5 Ω objetivo, 10 Ω máximo.
- GE Sistemas Médicos 2 Ω objetivo, 5 Ω máximo.
- Instalaciones "IT" 1-2-5 Ω objetivo.

Resumen: La especificación de resistencia a tierra (tantos ohmios Ω) varia con:

- La aplicación específica (Puesta a Tierra de neutro, pararrayos, reducción de ruido electrónico, protección de personal, etc.).
- La norma vigente para la aplicación.
- El país con sus propias normas.
- El fabricante del aparato / dispositivo particular.

Elementos / Componentes para Elaborar Sistemas de Puesta a Tierra

- Jabalinas y electrodos de aterramiento.
- Varillas de cobre, acero, acero bañado por cobre, acero galvanizado.
- Tubos electrolíticos: verticales o horizontales.
- Electrodos incrustados / enterrados en concreto (método "Ufer").
- Anillo de aterramiento del edificio.

- Anillo de aterramiento de la torre (si sea separada del edificio).
- Conductores de aterramiento: el neutro del transformador + alambre de protección (cable verde).
- Conductor hacia las jabalinas de Sistema de Protección contra Rayos (los pararrayos).
- Conductores radiales de aterramiento (contrapeso).
- Revestimiento metálico del pozo (cuando esté menos de 8m del edificio).
- Tubería metálica: agua y gas.
- Barra de aterramiento de equipos de telecomunicación.
- Estructura metálica que toca la tierra.
- Cualquier objeto metálico que toca la tierra como cercas, pasamanos.

Componentes de un Sistema de Puesta a Tierra:

- Anillo Enterrado en Tierra (Contrapeso).
- Electrodo de Puesta a Tierra: Vertical & Horizontal.
- Conductores al Electrodo Puesta a Tierra.
- Barras de Puesta a Tierra.
- Conductor de Puesta a Tierra.

Componentes de Aterramiento y Sus Limitaciones:

- Varillas Clavadas / Hincadas.
- Acero bañado por cobre o acero galvanizado.

Inconvenientes:

- Acero es activo químicamente: va a oxidar tarde o temprano
- Fácilmente afectada por el ambiente, pH del suelo, la temperatura y la humedad
- La resistencia aumenta progresivamente con la edad al oxidarse
- Por lo general es dañado durante la instalación: rasguños al clavar

Varillas de Cobre – Jabalinas de cobre (ventajas):

- Químicamente más estable que acero – Baja resistencia Inconvenientes:
- No se puede clavar; tiene que enterrar
- Mecánicamente débiles

Placas:

- Placas de cobre fino bajo postes o contrapesos complementarios
- Bastante área de contacto con el suelo

Inconvenientes:

- Pequeña esfera de influencia, el aumento de medición de resistencia.
- Susceptibles a los cambios ambientales y la corrosión.

Suposiciones Claves

- El suelo está uniforme y homogéneo en las tres dimensiones
- No hay otras capas de otra resistividad dentro del alcance de la “esfera de medición.”
- Los cálculos no comprenden variaciones estacionales de humedad, temperatura
- No hay objetos metálicos grandes en campo de medición para interferir

2.4.9 Ecuaciones para el Cálculo de Resistencia de varios elementos

Orden	Tipo	Condición para la clasificación	Resistencia de tierra
R_1			$R_1 = 0.366 \frac{\rho}{L} \log \frac{3L}{d}$
R_2	Esfera enterrada	$L > 16d, r_s = \frac{\sqrt{dL}}{2}$	$R_2 = 0.08 \frac{\rho}{r} \left(1 + \frac{r}{2h}\right)$
R_3	Placa de esfera enterrada	$h > 3.2r_p = 4.5r_s$	$R_3 = 0.125 \frac{\rho}{r} \left(1 + \frac{r}{2.5h + r}\right)$
R_4	Ámbito medio enterrada	$h > 1.1r_s = r_p$	$R_4 = 0.16 \frac{\rho}{r}$
R_5	Circular plata en la superficie de la tierra		$R_5 = 0.25 \frac{\rho}{r}$
R_6	barra recta enterrada un alambre	$h < 0.4L, r_p = \sqrt{dL}$	$R_6 = 0.366 \frac{\rho}{L} \left(\log \frac{L}{d} + \log \frac{L}{4h} + 0.34\right)$
R_7	enterrado ángulo recto	$h > 0$	$R_7 = 0.366 \frac{\rho}{L} \left(\log \frac{L}{d} + \log \frac{L}{4h} + 0.5 + 0.38 \frac{h}{L}\right)$
R_8	círculo enterrado del cable	$h < 0.8L$	$R_8 = 0.366 \frac{\rho}{L} \left(\log \frac{L}{d} + \log \frac{L}{4h} + 0.81\right)$
R_9	estrella de cuatro puntos enterrados	$h < 0.12L$	$R_9 = 0.366 \frac{\rho}{L} \left(\log \frac{L}{d} + \log \frac{L}{4h} + 1.26 - 3.72 \frac{h}{L}\right)$

Tabla. 2.6 Ecuaciones para el Cálculo de Resistencia de varios elementos

Resistencia de una Sola Varilla

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

R = Resistencia en Ohmios ρ = Resistividad Ω -cm

L = Longitud de la Varilla a = Diámetro de la Varilla

Ambos "L" y "a" en centímetros

[1 Ω -m = 100 Ω -cm] - tenga cuidado con las unidades

Resistencia de Dos Varillas

$$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^2}{5s^2} \dots \right)$$

R = Resistencia ρ = Resistividad

L = Longitud de la Varilla a = Radio de la Varilla

s = Separación entre varillas

Resistencia de Cable Horizontal

$$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$$

R = Resistencia ρ = Resistividad

L = Longitud de cable a = Radio del conductor

s/2 = Profundidad

Advertencia con las Fórmulas

Las fórmulas tiene que ver con suelos uniformes en las tres dimensiones x, y, z. En realidad encontramos suelos no uniformes y/o con capas bajo la superficie.

- Los suelos varían durante el año con humedad.
- Como cualquier diseño de ingeniería, tiene que incluir un buen margen:
- Variación en resistividad de suelo de 3:1 mínimo
- Degradación de materiales de 2:1 en su vida útil
- Recomendamos un margen mínimo de 25% encima de estas variaciones por “factores imprevistos”

Aproximaciones de Elementos Agregados

El problema mayor es que estamos tratando de efectos de campos electromagnéticos, no de resistencias simples en paralelo. - Podemos aproximar resistencias en paralelo cuando las esferas de influencia no se tocan una a la otra. Pero para conectar los elementos tenemos esferas electromagnéticas que se tocan.

- Para proyectos / diseños de alto valor o valor estratégico recomendamos el uso de programas de análisis que manipulan campos electromagnéticos por medio de empresas como Lyncole.

3. Desarrollo

3.1 Descripción de los circuitos realizados

El sistema de puesta a tierra que se propone es distinto a los ya utilizados contra descargas atmosféricas en una línea de transmisión.

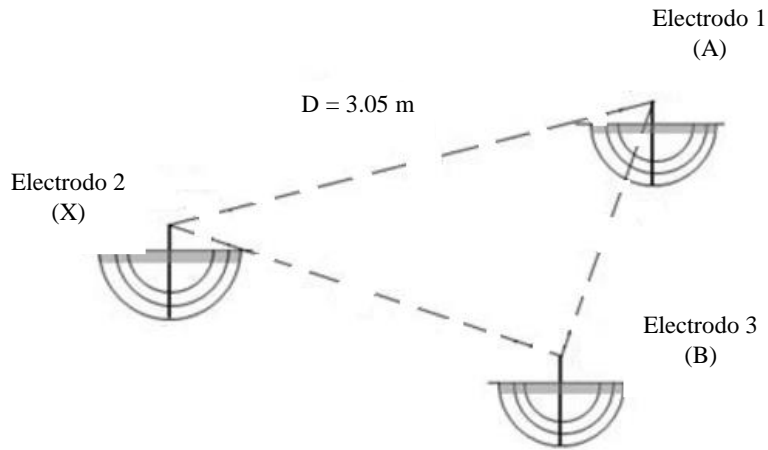


Fig. 3.1 sistema en delta

Se propuso un sistema en delta para las torres de líneas de transmisión por su fácil construcción con respecto a cualquier condición de terreno, la limitación a la diferencia de potencial entre cada electrodo. El área de influencia de cada electrodo trabaja de manera independiente y no se ve afectada por el de al lado.

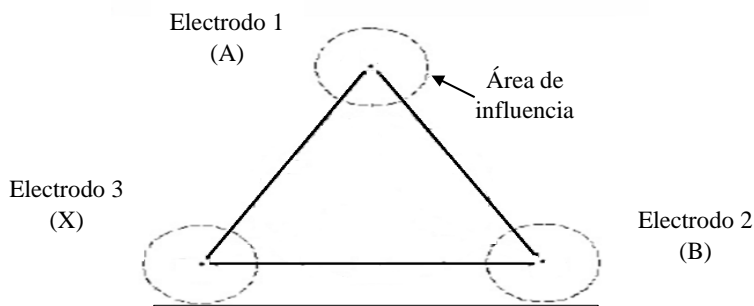


Fig. 3.2 electrodos en posición triangular

Este método consiste en enterrar tres electrodos (A, B, X) se disponen en forma de triángulo y se debe medir la resistencia combinada de cada par $(A + X) + (B + X) + (A + B) = X$

Siendo x la resistencia de puesta a tierra buscada, A y B las resistencias de los otros dos electrodos conocidos.

La resistencia en serie de cada par de puntos del sistema de puesta a tierra en disposición delta será determinada por el voltaje y corriente a través de la resistencia. Así quedan determinadas las siguientes ecuaciones.

$$R1 = (X + A) \quad R2 = (X + B) \quad \text{Donde } X = \frac{(R1+R2+R3)}{2}$$

3.2 Descripción de las pruebas, correcciones y validación

En el estudio realizado a la línea de subtransmisión de 115 KV, ANG-73730-MAP, se pudieron recabar los siguientes datos:

- Índices de salidas por fallas presentadas en la línea.
- Historial de fallas de los años más significativos.

AÑO	LINEA	OBSERVACIONES	CAUSA	DISTANCIA O NUM DE ESTRUCTURA	15Q E	N	ALTURA S.N.M.
2011	73730	SE RETIRAN APARTARRAYOS	ALTO VALOR DE RESISTENCIA A TIERRA	EST 291	502836	1733472	
2011	73730	BATERIA DAÑADA DEL EQUIPO NEUMÁTICO	FALTA DE ENERGIA	EST 283	502593	1739674	
2011	73730	SE ENCUENTRA NIDO (AGUILA) COLGADO DE LA TORRE	CONTAMINACION DE NIDOS	EST. 30	525090	1805214	655
2012	73730	FLAMEADO FASE AISLAMIENTO DE VIDRIO POR FUERTES LLUVIAS Y DESCARGAS ATMOSFERICAS	ALTO VALOR DE RESISTENCIA A TIERRA	EST. 137	518801	1779189	557
2012	73730	OPERO CORRECTAMENTE EL CIERRRE	CICLON	ESY 290	502622	1734819	
2012	73730	PROTECCION OPERADA	ALTO VALOR DE RESISTENCIA A TIERRA	EST 280	502750	1741748	
2013	73730	SE ABRIÓ PUENTE POR INSTRUCCIONES DEL ING. AMADO	LIBRANZA Y OPERACION MANUAL	EST. 295	504148	1730713	989
2013	73730	DESCARGAS ATMOSFERICAS	ANGULO DE BLINDAJE INADECUADO	EST 281	502683	1740707	
2014	73730	FALLA DEL APARTARRAYOS	POR DESCARGAS ADMOSFERICAS	EST 291 FASE A	502836	1733472	1609
2014	73730	APARTARRAYO EXPLOTADO POR DESCARGAS ADMOSFERICAS EST 289 FASE C Y RETENIDA COORDADA EST. 133	ALTO VALOR DE RESISTENCIA A TIERRA Y VANDALISMO	EST. 289 Y EST. 133	518787	1779976	556
2014	73730	FALLA TRANSITORIO POR TORMENTA ELECTRICA	ANGULO DE BLINDAJE INADECUADO	EST 274	503820	1743410	937
2014	73730	AISLADORES TIPO ALEA EXPLOTADOS EN EST. 287 Y CADENA AUXILIAR FLAMEAD EST. 288	ALTO VALOR DE RESISTENCIA A TIERRA	EST. 287 Y 288	502364	1736583	1497
2014	73730	NIDO EN LAS ESTRUCTURAS	CONTAMINACION NIDOS	EST. 39	525482	1802511	606
2015	73730	CADENA FLAMEADA	CONTAMINACION POR ESCREMENTO DE AVES	EST 276	503331	1742799	964
2015	73730	AISLAMIENTO FLAMEADO POR DESCARGAS ADMOSFERICAS TORMENTA TROPICAL	VIENTOS FUERTES POR TORMENTA TROPICAL	EST 100 MESETA	520485	1789845	695
2015	73730	CADENA FLAMEADA	CONTAMINACION POR ESCREMENTO DE AVES	EST. 41	525121	1801999	534
2016	73730	AISLAMIENTO DAÑADO	CONTAMINACION NIDOS	EST. 107	519772	1787562	572
2016	73730	FALLA TRANSITORIA	CONTAMINACION POR NIDOS	EST. 108 FASE C	519707	1787321	558
2016	73730	RECIERRE OPERO PROTECCION 21 SEL 311C FASE CG 0.41.05 KM	NBAI DE LA LINEA INADECUADO	EST 162	518106	1774684	562
2016	73730	EN PROCESO DE BUSQUEDA	EN PROCESO	EST 243	505868	1745956	999

Tabla. 3.1 Historial de causa de la línea ANG-73730-MAP

El número de la torre de la línea, en la cual se encontraron anomalías significativas que representarían un peligro para la continuidad del servicio eléctrico. La tabla anterior muestra el historial de algunas de las causas presentadas en las estructuras que conforman la línea de subtransmisión ANG-73730-MAP.

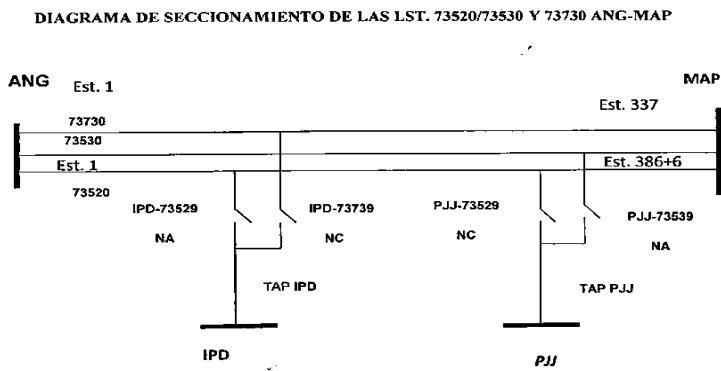


Fig. 3.2 Diagrama unifilar de la línea ANG-73730-MAP.

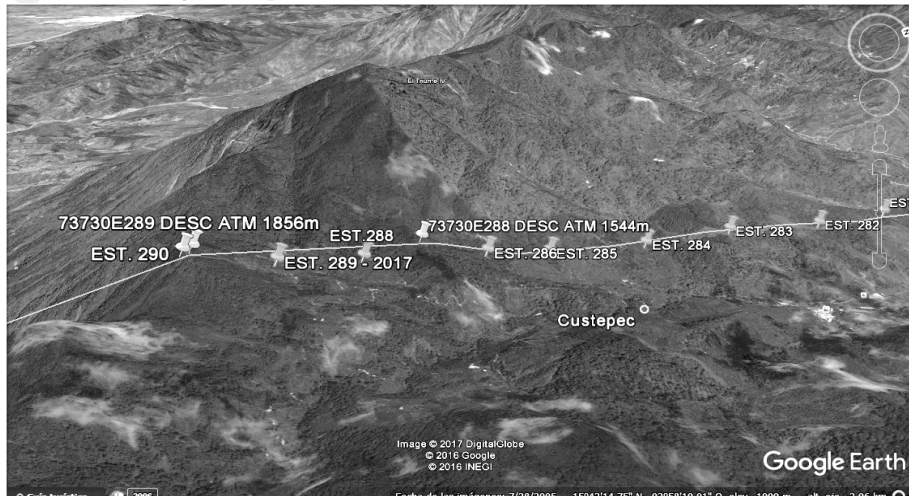


Fig. 3.3 Foto de la línea ANG-73730-MAP

Através de lo recabado anteriormente se localizo cada torre con el programa google earth gracias a las coordenadas en el banco de datos de las oficinas de Lineas de Subtransmisión.

Se hizo un trazo de la línea para tener una fácil visualización de su trayectoria y entender a las condiciones externas a las de operación a las que esta se somete día a día.

Como podemos ver en el mapa nuestra línea se encuentra entre las localidades de Custepec y El triunfo, pertenecientes al municipio de la Concordia, Chiapas.

Concentramos nuestro análisis de estudio en las torres en donde se han tenido mayor índice de descargas atmosféricas (rayos). Las torres que han presentado mayor índice de descargas atmosféricas son: la 291, 290, 289, 288 y 279. Cabe mencionar que el historial de salidas de la línea ha indicado que por tener un alto valor de resistencia a tierra al pie de la torre, las descargas que inciden sobre ellas no se drenan correctamente o en su totalidad, presentándose así el fenómeno denominado “corriente de frente inverso”, que es la encargada de sacar de servicio a dicha línea. Es por ello que es muy importante contar con un buen sistema de tierra a pie de la torre para conservar la continuidad del suministro eléctrico cuando una torre es sometida a una descarga atmosférica.

Con base a ello se hizo nuestro primer paso fue hacer un estudio de la zona en la cual se encuentran las estructuras que conforman la línea incluyendo los siguientes parámetros:

- Nivel Isoceraunico.
- Estratigrafía.

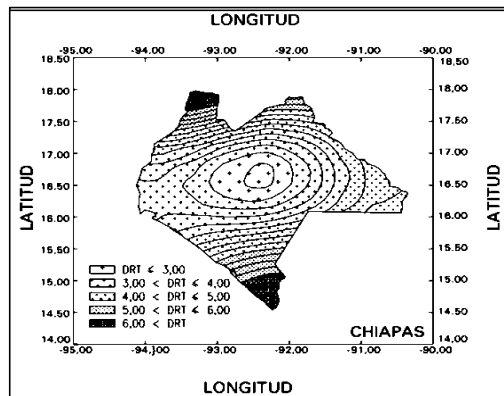


Fig. 3.4 Mapa de nivel isoceraunico en Chiapas.

Con respecto al mapa de nivel isoceraunico pudimos encontrar que la línea se encuentra operando en una zona con alto índice de tormentas. Eso quiere decir que la probabilidad de que incida un rayo sobre una de las torres es mayor.

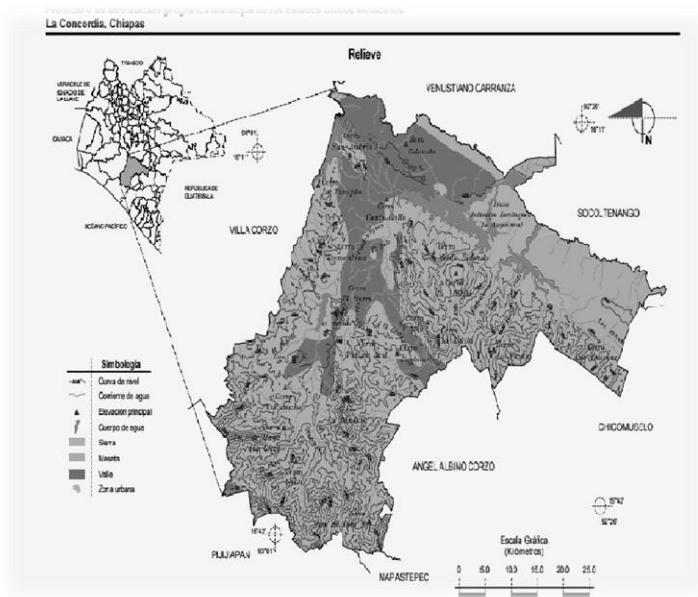


Fig. 3.5 *Fisiografía.*

Fisiografía	
Provincia	Cordillera Centroamericana (81.19%) y Sierras de Chiapas y Guatemala (18.81%).
Subprovincia	Sierras del Sur de Chiapas (81.19%) y Discontinuidad Depresión Central de Chiapas (18.81%).
Sistema de topofomas	Sierra alta de laderas escarpadas (70.22%), Valle con Lomeríos (10.97%), Meseta con cañadas (10.44%) y Valle de Laderas Tendidas con Mesetas (8.37%).

Tabla. 3.2 *Fisiografía.*

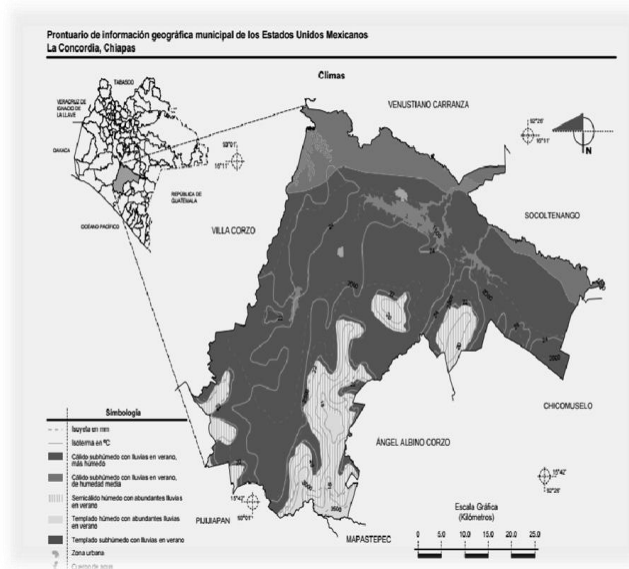


Fig. 3.6 *Clima.*

Clima	
Rango de temperatura	14 – 26°C
Rango de precipitación	1 000 – 4 000 mm
Clima	Cálido subhúmedo con lluvias en verano, más húmedo (72.71%), cálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (11.79%), semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano (13.32%), templado húmedo con abundantes lluvias en verano (1.98%) y templado subhúmedo con lluvias en verano (0.20%).

Tabla. 3.3 *Clima*

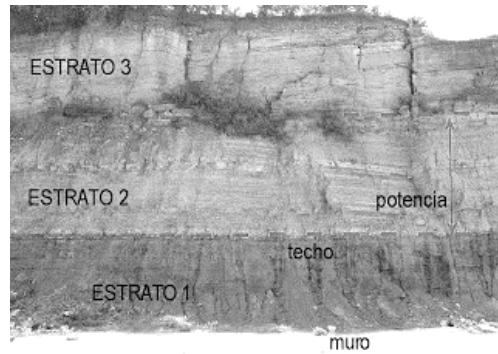


Fig. 3.7 Estratigrafía.

(Tipo de suelo que se encontró rumbo a la estructura 279).

Estratigrafía	
Ígnea intrusiva: Granito	(34.47%)
Ígnea extrusiva: Andesita	(3.55%)
Sedimentaria: Limolita-arenisca	(27.59%)
Caliza	(17.23%)
caliza-arenisca	(4.22%)
Conglomerado	(0.19%),
Metamórfica: Gneis	(0.04%)
Suelo: Aluvial	(8.60%)

Tabla. 3.4 Estratigrafía.

La información encontrada con respecto a la estratigrafía del lugar se determinó lo siguiente:

- Clima muy variante cada mes, dando como resultado un comportamiento drástico cada día.
- Sin calcular podemos deducir que los valores a obtener al realizar la medición llegaran al ser altos por la consistencia del terreno.
- Capas de suelo no uniformes, eso quiere decir que las condiciones para un sistema de tierra no son las ideales.

En la tabla siguiente están expuestos los valores de la resistividad de los materiales más importantes que constituyen los terrenos.

Resistividad de algunos tipos de materiales interesantes a las instalaciones eléctricas.		
TERRENO	RESISTENCIA (OHM) 5/8 X 1.5 m	RESISTIVIDAD OHM X CM ³
	PROM. M/N MAX.	PROM. M/N MAX.
Relleno, ceniza, escoria, desechos de salmuera.	14 3.5 42	2.370
Arcilla, pizarra, suelo pedregoso, marga.	24 2 98	4.060 340
FUDEM con proporciones variables de arena y ripio.	93 6 800	15.800 1.000 135.000
Ripio, arena, piedras con pequeñas cantidades de arcilla, marga.	554 35 2.700	94.000 59.000 458.000

Tabla. 3.5 Resistividad de algunos tipos de materiales.

Los materiales que tienen los más altos valores de resistividad se pueden considerar como aislante, y los materiales que tengan los más bajos valores de resistividad como conductores no presentando problemas de dimensionamiento de los electrodos, mientras que sí originan problemas de protección personal. Así se desprende de esta tabla que un sistema de tierra sería completamente adecuado en terrenos de arcillas.

Las mediciones de la resistividad de la tierra también son útiles para encontrar la mejor ubicación y profundidad para electrodos de baja resistencia.

Tales estudios se realizan, cuando se van a construir unidades eléctricas nuevas tales como: estación generadora, subestación, torre de transmisión y central telefónica. En nuestro caso un nuevo sistema de tierra para las torres de transmisión de energía eléctrica.

Habiendo analizado los parámetros anteriores realizamos la medición de la resistividad del suelo al pie de la torre n° 290 (la que se encuentra a mayor altura que las demás y que probablemente puedan incidir mayor número de descargas atmosféricas).

La forma en la que se ingresó a la torre fue vía aérea, puesto que el camino de acceso hacia la misma, requiere de ciertas medidas precautorias y de seguridad por la fauna, flora y el terreno que hay hacia ella.

El método que utilizamos para la medición de la resistividad del suelo fue la del método de Wenner.

Este mismo método se implementó en todas las estructuras en las cuales realizamos los primeros estudios.



Fig. 3.8 ingreso a la estructura vía aérea.



Fig. 3.9 *Equipo de Medición.*

Preparación del equipo de medición al pie de la torre.



Fig. 3.10 *Estaca de lectura del equipo de resistencia del suelo.*

Se instalaron los electrodos del equipo de medición de resistividad del terreno.



Fig. 3.11 Ingreso a la estructura.



Fig. 3.12 Lectura por el método Wenner.

(Fig. 3.11) Se termina la instalación de los electrodos como lo indica el método de Wenner.

(Fig. 3.12) Se realiza la primera medición con una separación entre electrodos de 1.6 m.

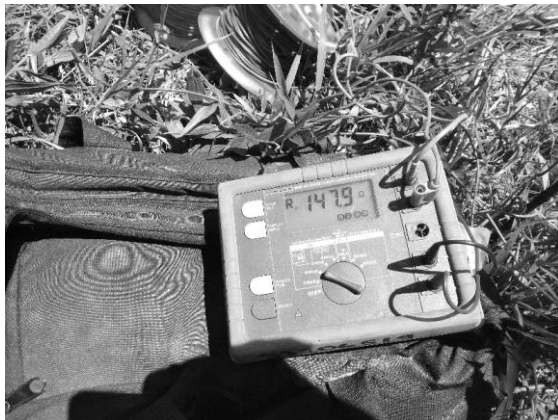


Fig. 3.13 Lectura 2 por el método de Wenner.

Segunda medición con una separación entre electrodos de 3.2 m.

Después de realizar los primeros estudios en la torre n° 290, realizamos otro estudio de campo en la estructura 291.

Como en la torre anterior se encontraba desconectada de su sistema de tierra se realizó el método de Wenner. La medición del sistema de tierra en la 291 no fue del todo necesario puesto que las condiciones del terreno son las mismas a la anterior y este contaba con un sistema de puesta a tierra a pie de la torre, por lo tanto solo se hizo la medición del mismo con un multímetro de gancho (para la medición de sistemas de puesta a tierra) para saber si los valores eran los correctos con respecto a la normatividad de CFE.



Fig. 3.14 Estructura.

(Indicativo del orden de los “pies” de la torre a los cuales se les realizó la medición).

El sistema de puesta a tierra que se encontró al “pie” de la torre era el incorrecto con respecto a la norma de CFE.

Los electrodos que se encontraron estaban enterrados en el concreto lo cual significa que no está bien aterrizada y es por ello que el sistema no puede actuar para proteger a la línea ante una descarga atmosférica.

Las condiciones del terreno en la que se encuentra la torre son muy poco favorables para instalar un sistema de tierra.

Valores obtenidos:



Fig. 3.15 Lectura Pata 1 de la estructura.

“Pie” de la torre número 1.



Fig. 3.16 Lectura Pata 2 de la estructura.

“Pie” de la torre número 2.



Fig. 3.17 Lectura Pata 3 de la estructura.

“Pie” de la torre número 3.



Fig. 3.18 Lectura Pata 4 de la estructura.

“Pie” de la torre número 4.

De los valores obtenidos en la medición de la resistividad del terreno y del sistema de puesta a tierra en las estructuras. Proponemos el siguiente sistema de tierra a partir de este caso en particular como una solución contra la alta resistividad encontrada en el terreno, en el cual se encuentran instaladas las torres que conforman la línea ANG-73730-MAP, para así poder drenar las corrientes de rayos que inciden sobre ellas y mantener la continuidad del servicio eléctrico y la calidad de dicho suministro.

- | | |
|-------------------------------------------------------------|----------------------|
| a). Resistividad del terreno. (Ver Estudio de Resistividad) | P = 147.9 ohm-mto. |
| b). Longitud de la varilla de tierras. | Lvs = 3.05 mts. |
| c). Diámetro de la varilla de tierras. | Dvs = 0.0159 mts. |
| d). La corriente de falla a tierra. | Ice = 20,334 Amp. |
| e). La resistividad del piso en el área. | Pp = 1486.8 ohm-mto. |
| f). Profundidad de enterramiento de la malla. | h = 0.60 mts. |
| g). Resistencia esperada (CFE 00JL0 -28-1999) | Resp = 10.00 ohms. |
| h). Factor de división de corriente | Fdc = 0.60 |

Área ocupada por el sistema de tierra.

Puesto a que nuestro arreglo tiene la forma de un triángulo equilátero, el área ocupada por nuestro sistema de tierra en disposición en delta será:

$$A = \frac{b * h}{2} = \left((1.5m) * \frac{(3m)}{2} \right) = 2.25m^2$$

As = 2.25 m².

Factor Por Decremento. (Df)

El factor por decremento se aplica de acuerdo a la duración de la falla, esta se considera a 0.25 Seg. (Ver Pag.105 ANSI / IEEE Std. 80-1986). Este valor se puede considerar completamente seguro.

(Ver tabla 6, Pág. 105 ANSI / IEEE).

Df = 1.1 (t = 0.25 seg)

Factor Por Crecimiento. (Cp.).

El factor por crecimiento del sistema toma en consideración la corriente de Corto - Circuito debido al crecimiento de la red (C.F.E.)

Cp. = 1 .2

CORRECCION DE LA CORRIENTE.

I corregida = (I_{cc}) (D_f) (C_p) (F_{dc}) -----> I_{cc} = 16,105 Amp.

CALCULO DE LA SECCION DEL CONDUCTOR.

$$A = \frac{I_{cc}}{\sqrt{\frac{\log_{10} \frac{(T_m - T_a)}{234 + T_a} + 1}{32.85 \cdot S}}}$$

I_{cc} = 16.105 Amp.

T_f = 0.25 seg.

S = 0.5 seg. * Valor de $\sqrt{0.25}$ seg.

T_m = 1083 °C * valor para calcular el cable.

T_a = 40 °C

$$A = \frac{16,105}{\sqrt{\frac{\log_{10} \frac{(1083 - 40)}{234 + 40} + 1}{32.85 \cdot 0.5}}}$$

A = 79.043 cm = 79 kcm. = 40.052 mm²

Cobre Desnudo

Calibre	Área de la sección transversal Nominal	Peso aprox	TEMPLE SEMIDURO								
			CLASE AA		CLASE A		CLASE B				
			# de hilos	Resistencia eléctrica CD a 20°C Nominal	Díámetro total Nominal	# de hilos	Resistencia eléctrica CD a 20°C Nominal	Díámetro total Nominal	# de hilos	Resistencia eléctrica CD a 20°C Nominal	Díámetro total Nominal
AWG / kcmil	mm ²	kg / km	ohm / km	mm	ohm / km	mm	ohm / km	mm			
14	2.08	18.88						7	8.740	1.85	
12	3.31	29.99						7	5.500	2.33	
10	5.26	47.70						7	3.460	2.93	
8	8.37	75.87						7	2.160	3.70	
6	13.30	120.60						7	1.370	4.67	
4	21.2	191.80						7	0.861	5.88	
2	33.62	304.90	3	0.541	8.14	7	0.541	7.42	0.561	7.42	
1	42.4	384.60						19	0.429	8.44	
1/0	53.5	484.90	7	0.3400	9.36	7	0.3400	9.36	0.340	9.47	
2/0	67.4	611.40						19	0.270	10.63	
3/0	85	770.90	7	0.214	11.8			19	0.214	11.94	
4/0	107	972.10						19	0.170	13.40	
250	126.7	1149.0	12	0.1440	15.24	19	0.144	14.57	0.144	14.62	
300	152.0	1378.0						37	0.120	16.01	
350	177.3	1608.0						37	0.103	17.29	
400	203	1838.0						37	0.090	18.49	
500	253.4	2298.0						37	0.072	20.67	
600	304	2757.0				37	0.0599	22.64	61	0.599	22.67
750	380	3446.0				37	0.0479	25.31			
1000	507	4595.0							61	0.0359	29.27

Nota: Los datos dimensionales, de pesos y de parámetros eléctricos, están sujetos a variaciones por los procesos de fabricación y por las tolerancias indicadas en las Normas y Especificaciones de referencia.

Tabla. 3.6 Calibres de conductores AWG.

El área obtenida, comprende a un calibre de cobre # 1 AWG, pero se usará cable calibre 3/0 AWG, por cuestión de esfuerzos mecánicos y la normatividad de C.F.E.

Se obtiene el valor de la resistencia del terreno y de los electrodos del sistema.

- $R_1 = 190.1 \Omega$
- $R_2 = 147.9 \Omega$

Para la obtención del valor de la resistividad media del terreno se debe aplicar la ecuación de Wenner que, en su forma simplificada es:

$$\rho = (2\pi * RD)$$

Donde:

- ρ = valor de la resistividad media del terreno.
- $\pi = 3.14159$
- R = Valor indicado en el instrumento de medición.
- D = Distancia entre electrodos expresada en metros.

De esta forma se obtiene la resistividad media del terreno desde la superficie hasta una profundidad igual a la distancia D entre electrodos. Realizando diversas mediciones con diferentes distancias entre electrodos se obtiene la información requerida para determinar las capas del terreno.

Sustituimos los valores de la medición en la formula pero en este caso en particular trabajaremos con la medición de 147.9Ω pues es el valor de la segunda medición y donde encontramos la menor oposición de resistividad por parte del terreno.

$$\rho = (2) (\pi) (147.9) (3.2 \text{ m}) = 2973.7 \Omega/\text{m}$$

Ya que tenemos la resistividad del terreno tenemos que obtener la resistencia de nuestro sistema de tierra con las condiciones de nuestro terreno.

Tipo de Suelo: Arcilla

$\rho = 2973.7$ ohmios-m

5/8" de diámetro y 3 m de largo. Varilla (El tipo de varilla que utilizaremos, en este caso es por designación la utilización del grosor de nuestra varilla. En caso de que el resultado sea muy elevado es cuestión de cambiar por un grosor de varilla mayor).

$$R = \frac{2973.7}{2 (\pi)(300)} * (\ln \frac{(4)(300)}{0.794} - 1) = 9.967 \Omega.$$

Esto quiere decir que el valor de nuestro sistema de tierra cumple con lo que pide la normatividad de CFE.

Este valor es ideal puesto a que la teoría nos dice que el rayo se drenara al impactar con la torre si el sistema de tierra que se encuentra al pie de la torre es bajo.



Fig. 3.19 Varilla o electrodo de un sistema de puesta a tierra

Ahora que sabemos cuál será el valor del electrodo enterrado en el terreno en el que trabajará, se realiza el cálculo de la resistencia del conductor al cual se van a soldar las varillas. No obstante antes de realizar este punto se designa que tipo de arreglo de puesta a tierra se instalará al pie de la torre.

Nosotros optamos por un sistema de puesta a tierra en disposición en delta puesto que es la mejores resultados nos dio en lo calculado y que cumple con lo que exige la norma NMX-J-549-ANCE-2005 y la de CFE 00J00-52.

- La malla delta consiste en colocar 3 varillas dispuesta en forma de triángulo isósceles.
- La distancia entre las varillas debe ser igual a la longitud de la varilla.
- La varilla más cercana debe estar como mínimo a 0.5m al pie de la torre.
- El cable de conexión a tierra debe tener un calibre mínimo de N° 8 AWG en cobre.

El siguiente esquema muestra una de las conexiones más utilizadas y que mejor resultado arrojan en la práctica.

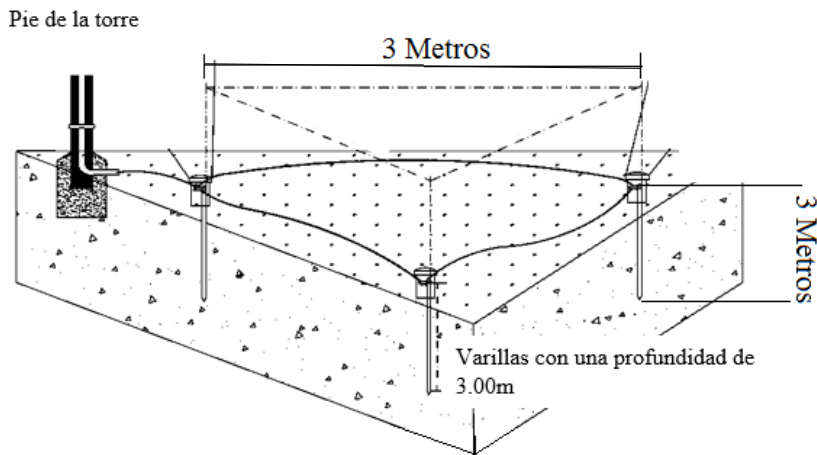


Fig. 3.20 imagen 2D Sistema de tierra en delta.

Habiendo especificado esto podemos proceder al cálculo de la resistencia de los conductores que unirán a nuestros electrodos (varillas).

$$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4l}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$$

$$R = \frac{1500}{19151.15} ((9.114 + 3.689) - (2) + (0.00625) + 0.00000195)$$

$$R = (0.00783 * 10.852)$$

$$R = 0.8499 \text{ Ohms}$$

Por lo que podemos apreciar el valor de la resistencia que presentará nuestro conductor es mínima. Esto nos quiere decir que es el indicado para nuestro sistema.

Total del conductor del sistema propuesto:

Aquí no se calculó puesto que la separación de nuestro sistema en delta por cada varilla es la longitud de cada uno y como la disposición en delta es un triángulo equilátero, entonces:

La separación entre cada varilla es de 3.05 metros y son 3 lados. Tenemos que por cada "delta" tenemos un total de 9.15 metros.

En cada estructura deberán instalarse por cada "pie" de la torre una "delta". Esto quiere decir su propio sistema de tierra.

Entonces $(9.15)(4) = 36.6m$ de cable de cobre "desnudo" del calibre 3/0.

Potencial de paso.

Es el valor que se genera entre dos puntos distantes a un metro, sobre la superficie del terreno, al ocurrir la falla máxima.

$E_0 = (K_s)(K_i)(P)(I_{cc})$ * Ver fórmula en *pág.* 114 ANSI / IEEE Std. 80-2015

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} * (1 - 0.5^{n-2}) \right)$$

$$K_s = \frac{1}{9} \left(\frac{1}{2*0.60} + \frac{1}{5+0.60} + \frac{1}{5} * (1 - 0.5^{23-2}) \right)$$

Una vez obtenida "Ks" procedemos a obtener el "Ep."

$$Ep = (0.3858)(4.61)(200) \left(\frac{16105}{2937} \right)$$

$$Ep = 1951 \text{ volts.}$$

Límites de tensión tolerables por el cuerpo humano.

- La corriente mínima, para producir fibrilación ventricular, es de 100 miliamperes.
- La corriente mínima para producir contracción muscular en el pecho, y que se tenga asfixia es de 25 miliamperes.
- La corriente mínima para evitar soltar las partes energizadas es de 9 y 6 miliamp. Para hombres y mujeres, respectivamente.

Los límites indicados, son para tiempos relativamente grandes, se pueden tolerar corrientes mayores durante tiempos cortos.

La ecuación que relaciona la corriente tolerable por un cuerpo humano promedio, con el tiempo de duración es: $I_b^2 * t = 0.0246$ (hasta $t = 3$ segs.), para el tiempo de liberación de la falla que consideramos de 0.250 seg. Se tendrá una corriente de:

(Ver fórmulas en págs. 39-46 ANSI / IEEE Std. 80-2015).

$$I_b = \sqrt{\frac{0.0246}{t}} \quad \text{por lo tanto: } I_b = 0.317 \text{ Amp.}$$

$$H_s = 0.15m$$

$$k = \frac{p-Pp}{p+Pp} \quad k = \frac{200-8534.4}{200+8534.4} \quad k = -0.95$$

Consultar h_s y k en gráf. ANSI/IEEE Std. 80-2015 pág. 41 obtenemos $C_s = 0.68$

Resistencia de los dos pies en serie

$$R_{2Fs} = 6 C_s (h_s, k) P_p$$

$$R_{2Fs} = 34820 \text{ ohms}$$

Resistencia de los dos pies en paralelo

$$R_{2Fp} = 1.5 C_s (h_s, k) P_p$$

$$R_{2Fp} = 8705.1 \text{ ohms}$$

Comprobación de las condiciones de seguridad.

Para verificar si la red es adecuada, nos valemos de la siguiente ecuación: (NORMA IEEE - 80-76)

$$\frac{K_m * K_i * p * I_{cc} * \sqrt{t f}}{L} - (0.235 * C (h, K) P_p) < 157$$

$$\frac{0.5561 * 3.63 * 200 * 16,105 * \sqrt{0.25}}{2,936.73} - (0.235 * 8,534 * 0.68) < 157$$

$$-257 < 157$$

Comparación de voltajes generados tolerables.

TENSION EN LA RED GENERAL AL OCURRIR EL CORTO CIRC. MAXIMO	TENSION QUE PUEDE TOLERAR EL PERSONAL QUE TRANSITA EN UNA TORRE DE TRANSMISION
$E_p = 1,951 \text{ Volts}$	$V_p * P_p = 11,236 \text{ Volts}$
$t_m = 2,214 \text{ Volts}$	$V_c * P_p = 3,044 \text{ Volts}$

Tabla 3.7 Límites tolerables.

4. Resultados y Conclusiones

De lo realizado en este estudio y las mejoras realizadas a las torres más críticas la 291 y 290 podemos concluir lo siguiente:

En caso de la torre con numeración 291 que contaba con un sistema de puesta a tierra se determinó que este no estaba diseñado apropiadamente, puesto sus valores de resistencia estaban muy elevados sobrepasando lo que dicta la norma de CFE 00J00-52, por lo que las corrientes inducidas por descargas atmosféricas y cortocircuitos no se drenaban a tierra produciendo fallas de “corriente de frente inverso” (para el caso de una descarga atmosférica), inestabilidad en el sistema eléctrico, sobrecalentamiento en los conductores que conforman la línea produciendo interrupciones en el sistema. Haciendo que los costos de mantenimiento sean muy elevados para una sola torre. La problemática no solo se limita para una sola torre si no que en el estudio que se realizó a dicha línea se encontró que la mayoría de las estructuras que la conforman, no cuentan con un buen sistema de puesta a tierra o no cuentan con dicho sistema, tal es el caso de la torre con numeración 290 y en la cual se realizó el estudio e instalación para probar el sistema de puesta a tierra. Como se puede apreciar en las siguientes imágenes, los valores obtenidos en la medición de los electrodos de las torres que contaban con dicho sistema sobrepasan lo permitido por la norma CFE 00J00-52.



Fig. 4.1 Medición del sistema de tierra de la estructura 235.



Fig. 4.2 Medición del sistema de tierra de la estructura 136.

Estos datos se obtuvieron en los sistemas de puesta a tierra de las estructuras 235 (**Fig. 4.1**) y 136 (**Fig. 4.2.**)

Se puede resumir que las fallas presentadas en las estructuras que cuentan con esta misma problemática ha sido por la poca atención que se le ha dado al sistema de puesta a tierra y al estudio del mismo. No obstante las que no cuentan con este método quedan totalmente vulnerables a estos fenómenos por lo que en este punto recae la responsabilidad en el personal de campo, puesto que no reportan con exactitud que estructuras les hace falta este sistema de puesta a tierra y más para las torres de difícil de acceso.



Fig. 4.3 Estructura 291 vista aérea.

Como conclusión, los problemas encontrados aquí se atribuyen a la falta de importancia de un sistema de puesta a tierra como medida de protección ante las anomalías ya mencionadas y que le suceden a la línea ANG-73730-MAP.

Nuestra propuesta de sistema de puesta a tierra ha sido diseñada como método de mejora para las torres de la línea ANG-73730-MAP ante las descargas atmosféricas y cortocircuitos. Por el momento solo se tiene dos estructuras con el sistema, pues este se encuentra en periodo de prueba por parte de CFE para su evaluación en esta temporada de lluvias y huracanes (que tuvo como inicio el 9 de mayo y terminará el próximo 30 de noviembre), de tener una respuesta positiva la CFE realizará la instalación de nuestra propuesta en toda la línea y realizarán el estudio hacia las líneas que se encuentren en las mismas condiciones.

Otro punto importante a resaltar y como un resultado muy efectivo es que se le dio a conocer al personal de campo de CFE la importancia de un sistema de puesta tierra por lo que se capacitó al personal sobre cómo realizar las mediciones de resistividad del suelo y la verificación de la resistencia de puesta a tierra para una torre de transmisión.

Referencias Bibliográficas

- [1] Ávila, N. B. (2012). *DISCUSIÓN DE LA FÓRMULA DE CÁLCULO PARA LA RESISTENCIA A TIERRA DE UN VARILLA*. México, D.F.: IEEE.
- [2] Canchola, I. I. (2008). *SELECCIÓN DE ELECTRODOS Y RELLENOS QUÍMICOS PARA SISTEMAS DE TIERRA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN*. Guadalajara, Jalisco: IEEE.
- CFE. (2010). *NORMA-CFE 00JL0 -28-1999*. MEXICO: CFE.
- CFE. (2006). *Redes de Tierra para Estructuras de Líneas de Transmisión Aéreas de 69 a 400 KV*. MEXICO: CFE.
- CFE. (2007). *CFE 2007, "Curso Integral sobre Líneas de Transmisión"*, Subdirección de Construcción, CPTT. MEXICO: CFE.
- CFE. (2007). *CFE 2007, "Curso Integral sobre Líneas de Transmisión"*, Subdirección de Construcción, CPTT. MEXICO: CFE.
- CFE. (2008). *CFE J6100-54, "Postes Metálicos para Líneas de Transmisión y Subtransmisión"*. MEXICO: CFE.
- CFE. (2012). *CFE 56100-16-2012 - Electroodos para Tierra*. MEXICO: CFE.
- CFE. (2012). *CFE D8CME-07-2012 - Protección Anticorrosiva para Cimentación de Estructuras Autosoportadas de Líneas de Transmisión*. MEXICO: CFE.
- G. López Ruiz, G. E. (2007). *APLICACIÓN DE APARTARRAYOS A LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN*. ACAPULCO, GRO: IEEE.
- [3] Harper, G. E. (2008). *ASPECTOS METODOLÓGICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UNA LINEA DE TRANSMISION ANTE DESCARGAS ATMOSFERICAS*. ACAPULCO, GRO: IEEE.
- (2014). IEEE. (2014). *"IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. IEEE Std 142-2014*. E.U.A: IEEE.
- [4] M.C. Isaías Ramírez V., D. R. (2012). *DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA DE LAS TORMENTAS ELECTRICAS EN LA REPUBLICA MEXICANA UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES*. ESTADO DE MEXICO: IEEE.
- Moguel, I. E. (2009). *APARTARRAYOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN UNA SOLUCIÓN PARA DISMINUIR LOS ÍNDICES DE FALLAS PROVOCADAS POR LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS*. ACAPULCO, GRO: IEEE.
- (2007). *NFPA 780 Standard for the Installation of Lightning Protection Systems, 2007*. MEXICO: IEEE.

Oropeza, I. J. (2005). *Libro de Oro de Puesta a Tierra Universal*. MEXICO: Ing. Javier Oropeza Ángeles.

[5] PAREJA, D. F. (2009). *ESTABILIZAR UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN: UNA PROTECCIÓN CONTRA CIERTOS TIPOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS*. ACAPULCO, GRO: IEEE.

Ruiz, J. C. (2008). *EVALUACIÓN DE COSTOS TOTALES DE LINEAS ÁEREAS TOMANDO EN CUENTA LA OPERACIÓN A LO LARGO DE VARIOS AÑOS*. ACAPULCO, GRO: IEEE.

(2007). *Std. IEEE 1100-1999 (Libro Esmeralda) Alimentación y puesta a tierra equipos electrónicos*. E.U.A: IEEE.

(2007). *Std. IEEE 141-1993 (Libro Rojo) Electric Power Distribution*. MEXICO: IEEE.

Dwight, H.B. (2010) "Calculations of resistance to Ground". *Transactions AIEE*, Vol. 55 p. 1319-1328.

Anexos

Apéndice: A

Índice de Interrupciones por Flameo Inverso

Flameo Inverso

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

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

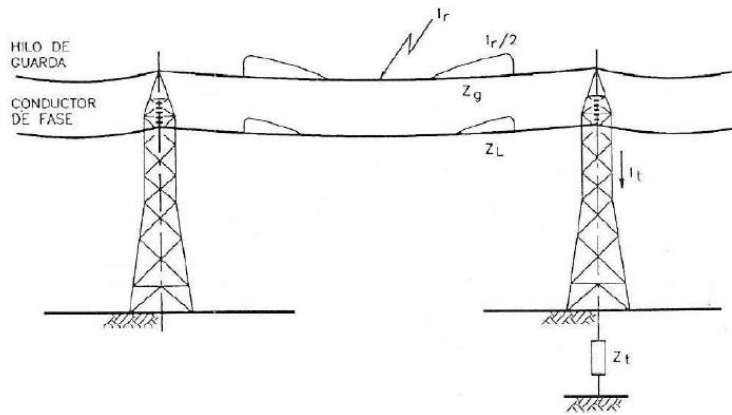


Fig. 1 Anexo A.

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

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

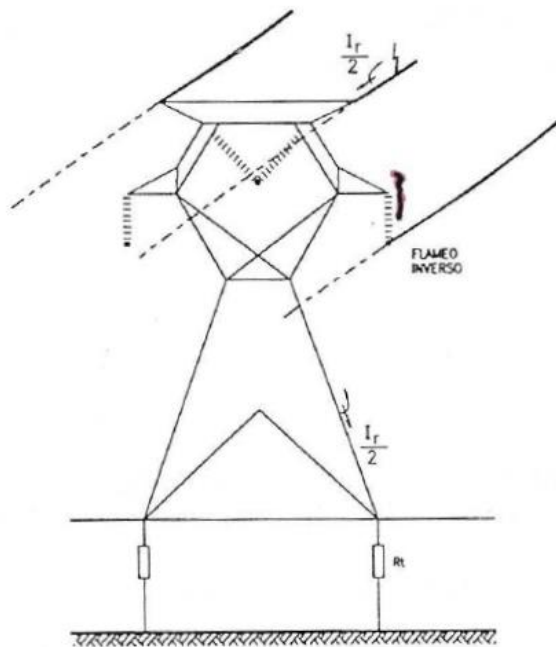


Fig. 2 Anexo A

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

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

- Tensión de operación de la línea.

Número de salidas por flameo inverso

Para la obtención del número de salidas por flameos inversos se consideran todos los parámetros mencionados en el apartado anterior, los cuales varían de acuerdo a sus distribuciones de probabilidad. Los parámetros mencionados se ingresan a un software para realizar el análisis y calcular el número de salidas por flameo inverso. En todos los análisis obtenidos se consideró un valor de $N_g = 2$ rayos/km²/año. La gráfica de la derecha muestra los resultados de estos cálculos para un nivel de tensión de 115 KV.

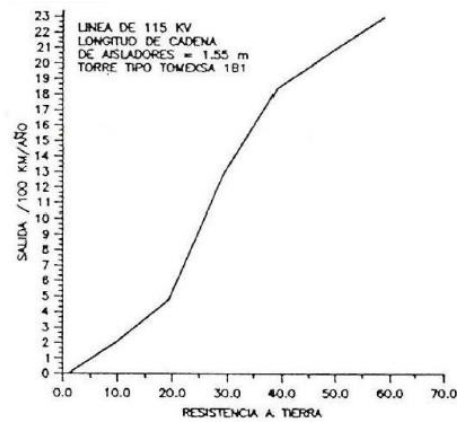


Fig. 3 Anexo A.

Apéndice B

Listado de abreviaturas y símbolos

3ϕ	3 fases
2ϕ	2 fases
1ϕ	1 fase
E	Intensidad del campo eléctrico
J	Densidad de corriente, o parcial de electrodo
B	Inductancia magnética
V	Tensión eléctrica, diferencia de potencia
p	Resistividad eléctrica, distancia radial
Y, k	Conductividad eléctrica
G	Conductancia eléctrica
D	Diámetro de sección transversal electrodos
I_c	Corriente de cuerpo
I	Intensidad de la corriente eléctrica
J	Corriente de electrodo
J_{pe}, I_{pe}	Corriente peligrosa de electrodo
R_c	Resistividad del cuerpo

Apéndice C

Glosario

Bajante: Elemento conectado eléctricamente entre los pararrayos y la puesta a tierra respectiva, con el fin de proteger los equipos y/o instalación.

Corriente de tierra: Corriente circulando hacia o desde la tierra o su cuerpo equivalente que le sirve de tierra.

Corto circuito: Fenómeno eléctrico ocasionado por una unión de muy baja resistencia entre dos o más puntos de diferente potencial.

Electrodo auxiliar de tierra: Electrodo de tierra con cierto diseño o funcionamiento restringido. Su función primaria consiste en ayudar a conducir la corriente de falla a tierra

Electrodo de tierra: Conductor embebido en la tierra y utilizado para recolectar las corrientes de tierra o disipar corrientes hacia la tierra.

Material superficial: Material instalado en la superficie del suelo, que por lo general tiene un valor de resistividad alto. Comúnmente se emplea material granular, asfalto o materiales artificiales. Esta capa de material afecta perceptiblemente la corriente del cuerpo para las tensiones de contacto y de paso.

Falla: Alteración intencional o fortuita de la capacidad de un sistema, componente o persona para cumplir una función requerida. Evento no planeado que puede ocurrir en cualquier sistema de potencia.

Potencial eléctrico: Diferencia de potencial entre el punto y alguna superficie equipotencial, usualmente la superficie del suelo, a la cual arbitrariamente se le asigna potencial cero (tierra remota).

Puesta a tierra o aterrizado: Sistemas, circuitos o equipos que serán provistos con tierra con el propósito de establecer un circuito de retorno de la tierra y mantener su potencial aproximadamente igual al potencial de tierra.

Resistividad del suelo: Representa la resistencia específica del suelo a cierta profundidad, o de un estrato del suelo; se obtiene indirectamente al procesar un grupo de medidas de campo;

su magnitud se expresa en ($\Omega.m$) o ($\Omega.cm$) y es inversa a la conductividad. La resistividad eléctrica (ρ): Es la relación entre el gradiente de potencial en un material y la densidad de corriente que resulta en el mismo. Es la resistencia específica de una sustancia. Numéricamente es la resistencia ofrecida por un cubo de 1m x 1m x 1m, medida entre dos caras opuestas.

Resistividad aparente: Es la resistividad obtenida con una medida directa en el suelo natural, bajo el esquema geométrico especificado por el método de cuatro (4) electrodos, aplicado con circuitos independientes de corriente y potencial; en suelo estratificado es sólo un indicador de la resistividad global hasta cierta profundidad y se requieren varios valores con diferentes distancias entre los electrodos, para calcular las resistividades de cada estrato.

Resistividad eléctrica (ρ): Es la relación entre el gradiente de potencial en un material y la densidad de corriente que resulta en el mismo. Es la resistencia específica de una sustancia. Numéricamente es la resistencia ofrecida por un cubo con dimensiones de 1m x 1m x 1m.

Resistencia mutua de electrodos: Fenómeno resistivo que aparece entre electrodos de puesta a tierra o puntos próximos en el suelo, mediante el cual, la corriente que se dispersa a través de uno de ellos, modifica el potencial del otro. Su unidad es el (Ω).

Sistema de tierra: es un mecanismo de seguridad que forma parte de las instalaciones eléctricas y que consiste en conducir eventuales desvíos de la corriente hacia la **tierra**, impidiendo que el usuario entre en contacto con la electricidad

Tensión de choque: Comprende las tensiones de contacto y paso.

Tensión de paso: Diferencia de tensión en la superficie, experimentada por una persona con los pies separados una distancia de un metro y sin estar en contacto con ningún objeto aterrizado.

Tensión de contacto: Diferencia de tensión entre el GPR y la tensión en la superficie en el punto en donde una persona se para, mientras al mismo tiempo tiene sus manos en contacto con una estructura puesta a tierra.

Tierra: Conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por la cual un circuito eléctrico o equipo es conectado a la tierra o a un cuerpo conductor de tamaño relativamente grande que sirve en lugar de la tierra.

Tetanización: Movimiento incontrolado de los músculos como consecuencia del paso de la energía eléctrica. El cual dependiendo del recorrido de la corriente se pierde el control de las manos, brazos, músculos pectorales entre otros

Aislante 81^a sílice: Es una tecnología de fabricación microelectrónica en la que se sustituye el sustrato tradicional de fabricación de obleas de silicio mono cristalino, por un sándwich de capas de semiconductor, aislante y semiconductor.

Compacidad: Un conjunto compacto es un subconjunto de un espacio topológico, que como subespacio topológico (con la topología inducida) es en sí mismo un espacio topológico compacto.

Hilo de corriente: Conjunto de filamentos finos y flexibles entrelazados cubiertos de un material aislante, empleado como conductor de electricidad.

Isoceraunico: representa los días de tormenta que aparecen al año por kilómetro cuadrado y como mínimo la aparición de un solo rayo.

Apéndice D

Glosario de imágenes

Fig. 2.1 *Conductor ACSR.*

Fig. 2.2 *Torre Autosoportada.*

Fig. 2.3 *Torres Autosoportadas Tubulares.*

Fig. 2.4 *Torres con Retenidas.*

Fig. 2.5 *Incidencia de Descargas Atmosféricas.*

Fig. 2.6 *Densidad de Rayos a Tierra.*

Fig. 2.7 *Densidad de Rayos a Tierra.*

Fig. 2.8 *Cable de guarda.*

Fig. 2.9 *Diseño de cables de guarda en torres de alta tensión.*

Fig. 2.10 *Ilustración Hilo de guarda en torres de alta tensión.*

Fig. 2.11 *Ilustración de Electrodo.*

Fig. 2.12 *Ilustración de placa de puesta a tierra.*

Fig. 2.13 *Electrodo en posición Horizontales.*

Fig. 2.14 *Mallas a tierra de 4 secciones.*

Fig. 2.15 *Mallas a tierra de 16 secciones.*

Fig. 2.16 *Conexiones Exotérmica.*

Fig. 2.17 *Arreglo para la Medición de la resistividad del suelo para torres de transmisión.*

Fig. 2.18 *Medición de resistencia para Red de Tierras para Líneas de Alta Tensión en Construcción.*

Fig. 2.19 *Direcciones preferentes para la medición de la resistencia de la red de tierra.*

Fig. 2.20 *Medición de la resistividad por el método de Wenner.*

Fig. 2.21 *Medición de la resistividad del suelo (vista plana).*

Fig. 2.22 *Dirección de la medición para las torres.*

Fig. 2.23 *Tratamiento de sales simples*

Fig. 2.24 *Comportamiento de la impedancia característica.*

Fig. 2.25 *Resistividad del terreno*

Fig. 2.26 *Configuración de dos contraantenas.*

Fig. 2.27 *Configuración de cuatro contraantenas.*

Fig. 3.1 *sistema en delta*

Fig. 3.2 *electrodos en posición triangular*

Fig. 3.2 *Diagrama unifilar de la línea ANG-73730-MAP.*

Fig. 3.3 *Foto de la línea ANG-73730-MAP*

Fig. 3.4 *Mapa de nivel isoceraunico en Chiapas.*

Fig. 3.5 *Fisiografía*

Fig. 3.6 *Clima.*

Fig. 3.7 *Estratigrafía.*

Fig. 3.8 *ingreso a la estructura vía aérea.*

Fig. 3.9 *Equipo de Medición.*

Fig. 3.10 *Estaca de lectura del equipo de resistencia del suelo.*

Fig. 3.11 *Ingreso a la estructura.*

Fig. 3.12 *Lectura por el método Wenner.*

Fig. 3.13 *Lectura 2 por el método de Wenner.*

Fig. 3.14 *Estructura. 291*

Fig. 3.15 *Lectura Pata 1 de la estructura.*

Fig. 3.16 *Lectura Pata 2 de la estructura.*

Fig. 3.17 *Lectura Pata 3 de la estructura.*

Fig. 3.18 *Lectura Pata 4 de la estructura.*

Fig. 3.19 *Varilla o electrodo de un sistema de puesta a tierra*

Fig. 3.20 *imagen 2D Sistema de tierra en delta.*

Fig. 4.1 *Medición del sistema de tierra de la estructura 235.*

Fig. 4.2 *Medición del sistema de tierra de la estructura 136.*

Fig. 4.3 *Estructura 291 vista aérea.*

Fig. 1 *Anexo A.*

Fig. 2 *Anexo A*

Fig. 3 *Anexo A.*

Apéndice E

Glosario de tablas

Tabla. 2.1 *Proceso de una descarga atmosférica.*

Tabla. 2.2 *Resistividad del terreno.*

Tabla. 2.3 *Configuraciones de contra-antenas para diferentes resistividades de terreno.*

Tabla. 2.4 *Resistencia del suelo*

Tabla. 2.5 *resistividad del terreno*

Tabla. 2.6 *Ecuaciones para el Cálculo de Resistencia de varios elementos*

Tabla. 3.1 *Historial de causa de la línea ANG-73730-MAP*

Tabla. 3.2 *Fisiografía*

Tabla. 3.3 *Clima*

Tabla. 3.4 *Estratigrafía.*

Tabla. 3.5 *Resistividad de algunos tipos de materiales.*

Tabla. 3.6 *Calibres de conductores AWG.*

Tabla 3.7 *Límites tolerables.*