

**ESTUDIO ECONÓMICO DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE PUESTA A
TIERRA PARA LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN EL MORRO – YOPAL A 115 kV.**

FERNANDO CHANAGA DELGADO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2004**

**ESTUDIO ECONÓMICO DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE PUESTA A
TIERRA PARA LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN EL MORRO – YOPAL A 115 kV.**

FERNANDO CHANAGA DELGADO

**Director
ING. CIRO JURADO**

**Trabajo presentado como requisito para optar el título de
Ingeniero Electricista.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2004**

A **Dios** por brindarme el mejor hogar que pude haber tenido, por ser un Padre sin igual que siempre está a mi lado apoyándome cual amigo fiel e incondicional.

A **mi familia** cuyo bienestar es mi mayor anhelo.

A mi madre **Cleotilde**, mis hermanos **Edward**, **Yolanda** y **Jaymers**.

Fernando Chanaga

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos:

Al director **Ing. Ciro Jurado Jerez** por su ayuda y colaboración.

A la **Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones**, por el convenio establecido para realizar las prácticas empresariales con la empresa J. E. Jaimes Ingenieros S. A.

Al **Ing. Ismael Grísales Ávila**, por su colaboración, apoyo y colaboración en el desarrollo de esta monografía.

A mi familia y amigos, por brindarnos la ayuda, fortaleza y motivación necesarias para alcanzar nuestros ideales.

Nota de aceptación:

Director del proyecto

Jurado

Jurado

Bucaramanga, 26 noviembre del 2004.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA	4
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1. MARCO TEÓRICO	5
1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL A LA PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE POTENCIA CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.	5
1.2 EFECTOS DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA.	6
1.2.1 Origen de la descarga atmosférica	6
1.2.2 Parámetros que caracterizan la descarga atmosférica.	8
1.2.2.1 Múltiples descargas	8
1.2.2.2 Intensidad y polaridad de la corriente de descarga	8
1.2.2.3 Forma de onda de la descarga atmosférica	9
1.2.2.4 Ángulo de Incidencia de la Descarga	9
1.2.2.5 Forma de incidir sobre las líneas de Transmisión o Distribución	10
1.2.3 Sobretensiones inducidas por descargas atmosféricas en las cercanías de la línea	11
1.2.4 Parámetros que influyen en la magnitud de la tensión inducida.	12
1.2.4.1 Velocidad de la descarga de retorno "Return Stroke"	12

1.2.4.2	Tiempo de frente de la tensión de retorno	12
1.2.4.3	Cable de guarda	12
1.2.4.4	Resistividad del terreno	12
1.2.5	Alternativas para disminuir su influencia.	12
1.2.6	Descargas Retroactivas (Descargas directas sobre postes, torres o cables de guarda)	12
1.2.7	Efectos de la resistencia de puesta a tierra.	14
1.2.7.1	Comportamiento del suelo	14
1.2.7.2	Impedancia de tierra ante impulsos de corriente	16
1.3	RESISTIVIDAD DEL TERRENO	18
1.3.1	La composición	19
1.3.2	Humedad y concentración de sales	20
1.3.3	Temperatura	20
1.3.4	Compacidad y granulometría	20
1.3.5	Estratigrafía	20
1.4	MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.	20
1.4.1	Método de Wenner	21
1.5	MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	22
1.5.1	Método de la caída de potencial	24
1.6	EL MÉTODO ARTIFICIAL PARA REDUCIR LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO	25
1.6.1	MATERIALES ACEPTABLES DE BAJA RESISTIVIDAD	27
1.6.1.1	Bentonita	27

1.6.1.2 Marconita	27
1.6.1.3 Yeso	27
2. DESARROLLO DEL TEMA EN LA PRÁCTICA EMPRESARIAL	30
2.1 PLANTEAMIENTO DEL TEMA	30
3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS REQUERIDAS PARA LA PUESTA A TIERRA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.	31
3.1 GENERALIDADES	31
3.2 MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO	31
3.3 MEDIDA DE LA RESISTENCIA	31
3.4 CONTRAPESOS	32
3.5 VARILLAS PARA PUESTA A TIERRA	33
3.6 CABLES DE PUESTA A TIERRA	33
4. DETALLE DE LA PUESTA A TIERRA	35
5. MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO	36
5.1 RECURSOS TÉCNICOS	36
5.2 MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO MÉTODO DE WENNER)	39
5.3 RESULTADOS DE LA MEDIDA DE RESISTIVIDAD	39
6. CÁLCULO TEÓRICO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	41
7. MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA.	44
7.1 PROCEDIMIENTO DE MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA PARA TORRES	44
7.1.1 Objetivos	44
7.1.2 Alcance	44

7.1.3 Responsable	44
7.1.4 Materiales y Equipos a utilizar	44
7.1.5 Procedimiento	44
7.1.6 Duración	46
7.1.7 Condiciones especiales en salud, seguridad, ambiental y calidad del proyecto	46
7.1.8 Documentos	46
7.1.9 Registro	47
7.2 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DE PUESTA A TIERRA	47
7.3 COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA CALCULADOS TEORICAMENTE CONTRA LOS VALORES OBTENIDOS A TRAVES DE LA MEDICIÓN	49
8. ALTERNATIVAS PARA REDUCIR LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	51
8.1 MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EMPLEANDO ELECTRODOS PROFUNDOS O ELECTRODOS MÚLTIPLES EN PARALELO	51
8.1.1 Varillas de mayor diámetro	52
8.1.2 Varillas más largas	52
8.1.3 Varillas en paralelo	53
8.2 REDUCCIÓN DE LA RESISTIVIDAD MEDIANTE PROCEDIMIENTOS ARTIFICIALES	54
8.2.1 Hidrosolta	55
8.2.1.1 Comparación entre el sistema de puesta a tierra con pozo de hidrosolta y el sistema de puesta a tierra tradicional	56
8.2.1.2 Instalación	57
8.2.2 ElectroPAT	60

8.2.2.1 Consideraciones en la Instalación de un electrodo vertical.	61
8.2.2.2 Procedimiento de Aplicación Industrial de “ElectroPAT®”	62
8.2.2.3 Comportamiento de una puesta a tierra con ElectroPAT	65
8.2.3 Favigel	67
8.2.3.1 Procedimiento de aplicación	68
8.2.3.2 Circuito equivalente	71
8.2.3.3 Como se realiza la hidratación	71
8.3 CONTRAPESOS	73
8.3.1 Alternativas de instalación de los contrapesos	74
9. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS PRESENTADAS PARA LA REDUCCIÓN DEL VALOR DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	76
9.1 COSTO ECONÓMICO DE LA REDUCCIÓN DE LA RESISTIVIDAD MEDIANTE PROCEDIMIENTOS ARTIFICIALES	76
9.1.1 Hidrosolta	76
9.1.2 ElectroPAT	77
9.1.3 Favigel	78
9.2 COSTO ECONÓMICO DE LA REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE LAS TORRES EMPLEANDO CONTRAPESOS	79
9.2.1 Calculo teórico de los contrapesos	79
9.3 RESULTADO OBTENIDO AL REALIZAR LA COMPARACION	84
10. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS MEDICIONES DE PUESTA A TIERRA DESPUÉS DE APLICAR LOS CONTRAPESOS	86

10.1 COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DESPUÉS DE APLICAR LOS CONTRAPESOS CALCULADOS TEORICAMENTE CONTRA LOS VALORES OBTENIDOS A TRAVES DE LA MEDICIÓN.	87
10.2 REGISTROS DE CONTRAPESOS INSTALADOS	88
10.3 FOTOGRAFÍAS DEL PROCESO DE INSTALACIÓN DE LOS CONTRAPESOS	95
11. CONCLUSIONES	99
BIBLIOGRAFÍA	101

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores medios de resistividad según la composición del terreno	19
Tabla 2. Rangos de resistencia del telurómetro Geotest 2016	37
Tabla 3. Rangos de resistividad del telurómetro Geotest 2016	38
Tabla 4. Valores de resistividad del terreno	40
Tabla 5. Valores de resistencia de puesta a tierra calculados teóricamente	42
Tabla 6. Valores de resistencia de puesta a tierra de las torres.	48
Tabla 7. Comparación de los valores teóricos de resistencia de puesta a tierra contra los valores medidos.	49
Tabla 8. Cantidad de pozos de hidrosolta para el mejoramiento de la resistencia de puesta a tierra en las torres.	76
Tabla 9. Costo económico de la aplicación de hidrosolta para el mejoramiento de la resistencia de puesta a tierra en las torres.	77
Tabla 10. Cantidad de pozos industriales de ElectroPAT para el mejoramiento de la resistencia de puesta a tierra en las torres.	77
Tabla 11. Costo económico de la aplicación de electroPAT para el mejoramiento de la resistencia de puesta a tierra en las torres.	78
Tabla 12. Cantidad de Dosis de 50 kg De Favigel para el mejoramiento de la resistencia de puesta a tierra en las torres.	78
Tabla 13. Costo económico de la aplicación de Favigel para el mejoramiento de la resistencia de puesta a tierra en las torres.	79
Tabla 14. Selección de contrapesos para el mejoramiento de la resistencia de puesta a tierra en las torres.	82

Tabla 15. Calculo teórico de la resistencia de puesta a tierra resultante después de la aplicación de contrapesos en las torres.	83
Tabla 16. Costo económico de la aplicación de contrapesos para el mejoramiento de la resistencia de puesta a tierra en las torres.	84
Tabla 17. Comparación de los costos económicos de los diferentes métodos para el mejoramiento de la resistencia de puesta a tierra en las torres.	84
Tabla 18. Resultados de la aplicación de contrapesos en la resistencia de puesta a tierra en las torres.	86
Tabla. 19. Comparación de los valores teóricos de resistencia de puesta a tierra con el uso de contrapesos teóricos contra los valores medidos.	87

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Forma de incidencia de las descargas sobre las líneas de transmisión.	10
Figura 2. Posibilidades de incidencia de las descargas sobre las líneas de transmisión.	13
Figura 3. Estratificación del suelo.	14
Figura 4. Ionización del suelo.	15
Figura 5. Resistencia a 60 Hz.	15
Figura 6. Modelamiento de los contrapesos.	17
Figura 7. Método de Wenner.	21
Figura 8. Método de medida sugerido por la IEEE.	23
Figura 9. Método de la caída de potencial o método del 62%.	24
Figura 10. Detalle de la puesta a tierra.	36
Figura 11. Telurómetro.	38
Figura 12. Método de Wenner	39
Figura 13. Ubicación de cables de medida.	47
Figura 14. Relación de resistencia con varillas de mayor diámetro	52
Figura 15. Relación de resistividad con varillas más largas.	53
Figura 16. Formas de instalación de los electrodos.	57
Figura 17. Comparación del comportamiento ante descargas atmosféricas de 10 kA (Malla tradicional Vs. Pozo de Hidrosolta)	60

Figura 18. Diagrama general de instalación del ElectroPAT.	60
Figura 19 Corte Vertical de una puesta a tierra para instalaciones industriales.	64
Figura 20. Grafico del comportamiento de la resistencia de puesta a tierra con Electro – PAT.	65
Figura 21. Aplicación en suelos blandos de favigel.	69
Figura 22. Aplicación en suelos arenosos de favigel.	70
Figura 23. Aplicación en suelos rocosos de favigel.	71
Figura 24. Circuito equivalente de favigel.	72
Figura 25. Reducción de la Resistencia de Puesta a tierra con Favigel.	72
Figura 26. Contrapesos en las líneas de transmisión.	74
Figura 27. Alternativa A de Instalación de contrapesos.	75
Figura 28. Alternativa B de Instalación de contrapesos.	75
Figura 29. Alternativa C de Instalación de contrapesos.	75
Figura 30. Registro de los contrapesos en la torre 1.	88
Figura 31. Registro de los contrapesos en la torre 2.	89
Figura 32. Registro de los contrapesos en la torre 2A.	90
Figura 33. Registro de los contrapesos en la torre 3.	91
Figura 34. Registro de los contrapesos en la torre 6.	92
Figura 35. Registro de los contrapesos en la torre 8.	93
Figura 36. Registro de los contrapesos en la torre 9.	94
Figura 37. Fotografía de excavación de la zanja para la instalación de los contrapesos. Vista lateral.	95

Figura 38. Fotografía de excavación de la zanja para la instalación de los contrapesos. Vista frontal.	96
Figura 39. Fotografía de la zapata de una torre con su respectiva puesta a tierra durante la excavación.	97
Figura 40. Fotografía final de la zapata de la torre con su respectiva puesta a tierra.	98

RESUMEN

TÍTULO:

“ESTUDIO ECONÓMICO DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN EL MORRO – YOPAL A 115 kV” *

2. AUTORES:

CHANAGA DELGADO, Fernando **

3. PALABRAS CLAVE:

Contrapeso
Sistema de puesta a tierra
Suelo artificial
Torre de transmisión

4. DESCRIPCIÓN:

Este trabajo, resultado de una práctica empresarial, busca básicamente, realizar un estudio técnico y económico de los sistemas de puesta a tierra, con el objetivo principal de reducir los valores de resistencia de puesta a tierra por debajo de los 20Ω en aquellas torres de la línea de transmisión a 115 kV El Morro – Yopal que no cumplen con este valor.

Dicho estudio, brindará a la empresa (JE Jaimes Ingenieros) un análisis económico comparativo de los diferentes sistemas de puesta a tierra para líneas de transmisión existentes en el mercado, que permita seleccionar aquel que sea viable económicamente para el proyecto y que brinde la solución técnica al problema planteado.

El texto contiene una recopilación de información sobre las diferentes alternativas existentes para reducción del valor de resistencia de puesta a tierra, necesaria para lograr que la puesta a tierra de las torres de la línea de transmisión anteriormente mencionada cumpla con las especificaciones técnicas exigidas.

*Proyecto de grado

**Facultad de Ciencias Físico-mecánicas; Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones; Ing. Ciro Jurado Jerez

ABSTRACT

TITLE:

“STUDY ECONOMIC OF THE DIFFERENT SYSTEMS OF GROUNDED FOR THE LINE OF TRANSMISSION THE MORRO – YOPAL TO 115 kV” *

AUTORS:

CHANAGA DELGADO, Fernando **

KEYWORDS:

Counterpoise
System of grounded
Artificial Earth
Transmission tower

DESCRIPTION:

This work, result of a managerial practice, looks for basically, to carry out a technical and economic study of the systems of grounded, with the main objective of reducing the resistance securities of grounded below the 20 Ω in that towers of the transmission line at 115 kV The Morro – Yopal that don't fulfill this value.

This study, will offer to the company (JE Jaimes Ingenieros) a comparative economic analysis of the different systems of grounded for existent transmission lines in the market that allows to select that that is viable economically for the project and that it offers the technical solution to the outlined problem.

The text contains a summary of information on the different ones alternative existent for reduction of the resistance value of grounded, necessary to achieve that the grounded of the towers of the line of previously aforementioned transmission fulfills the demanded technical specifications.

*Grade project

**Facultad de Ciencias Físico-mecánicas; Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones; Ing. Ciro Jurado Jerez

INTRODUCCIÓN

J. E. Jaimes Ingenieros S.A. es una empresa contratista con amplia cobertura nacional e internacional, que lleva a cabo proyectos de ingeniería especializada, en la actualidad tiene bajo su responsabilidad la construcción de la línea de transmisión a 115 kV El Morro – Yopal.

Dentro de la realización de este proyecto, se encuentra la construcción del sistema de puesta a tierra de las torres de la línea de transmisión, bajo unas especificaciones técnicas previamente establecidas.

Al llevar a cabo la construcción del sistema bajo un diseño establecido y realizar las mediciones de las resistencias de puesta a tierra de las torres se encuentra que varias de ellas no cumplen con el valor de resistencia requerido por las especificaciones técnicas, ante lo cual surge la necesidad de realizar un estudio cuyo objetivo final sea seleccionar el sistema de puesta a tierra que permita reducir los valores de resistencia de puesta a tierra para cumplir con el valor requerido y que además sea viable económicamente.

En esta monografía se da a conocer el resultado de dicho estudio, presentando inicialmente un marco teórico que ayuda a comprender la función primordial que cumple el sistema de puesta a tierra en la línea de transmisión y posteriormente se muestra el estudio de las diferentes alternativas para la reducción del valor de resistencia de puesta a tierra. Con base en la viabilidad económica se elige una alternativa y al final se presentan los resultados obtenidos con la aplicación de esta alternativa.

DEFINICIONES RELACIONADAS CON PUESTAS A TIERRA.

Aislamiento: Debe entenderse como aislamiento el material usado para aislar un conductor de otros. Para este fin se emplea papel de alta calidad, polietileno y cloruro de vinilo.

Conductividad: Es el poder conductor específico de una sustancia. Es el recíproco o inverso de la resistividad. Su unidad es el S/m (Siemens /metro).

Conductores: Un conductor es uno o varios hilos de cobre redondo, homogéneo y sólido previamente recocido. Según las consideraciones económicas es también posible utilizar conductores de aluminio.

Conexión de puesta a tierra: Soldadura exotérmica, lengüeta certificada, conector a presión o de cuña certificado o abrazadera certificada destinados a asegurar dos o más componentes de un sistema de puesta a tierra (SPT), por medio de una conexión especial diseñada.

Conexión equipotencial: Conexión eléctrica de tal manera, que ante el paso de una corriente quedan esencialmente al mismo potencial.

Corrientes espurias: Aquellas que circulan en el terreno y en la puesta a tierra por algún defecto.

Electrodo de puesta a tierra: Conductor o grupo de ellos en contacto con el suelo, para proporcionar una conexión eléctrica con el terreno.

Puesta a tierra: Grupo de elementos equipotenciales, en contacto eléctrico con el suelo o una masa metálica de referencia común, que distribuye las corrientes

eléctricas de falla en el suelo o en la masa. Comprende conexiones, cables enterrados y electrodos.

Resistividad eléctrica: Es la relación entre la diferencia de potencial en un material y la densidad de corriente que resulta en el mismo. Es la resistencia específica de una sustancia. Se da en ohmio-metro ($\Omega.m$).

Sistema de puesta a tierra: Conjunto de elementos conductores de un sistema de potencia específico, sin interrupciones, ni fusibles, que une los equipos eléctricos con el suelo o terreno. Comprende la puesta a tierra y todos los elementos puestos a tierra.

Suelo o Terreno: Capa de productos de meteorización, llena de vida, que se encuentra en el límite entre la roca inerte de la corteza y la atmósfera.

Suelo artificial: Compuesto preparado industrialmente de baja resistividad para potenciar la conductividad de un electrodo enterrado

Telurómetro: Equipo diseñado para medición de resistividad y resistencia de sistemas de puestas a tierra.

Tierra: Para sistemas eléctricos, es una expresión que generaliza todo lo referente a sistemas de puesta a tierra. En temas eléctricos se asocia a suelo, terreno, tierra, masa, chasis, carcasa, armazón, estructura o tubería de agua. El término "masa" solo debe utilizarse en aquellos casos en que no es el suelo, como en los aviones, los barcos y los carros.

OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA

OBJETIVO GENERAL

- Dar solución mediante esta práctica a una necesidad o problema presentado en la empresa, aplicando los conocimientos adquiridos durante la formación universitaria.
- Adquirir experiencia laboral en las áreas operativas y administrativas de una organización del sector eléctrico.
- Desarrollar la capacidad para identificar problemas y posibles causas, generar soluciones y tomar decisiones que permitan aportar al funcionamiento de la empresa.
- Cumplir los requisitos que exige la universidad para optar al título de ingeniero electricista; según lo estipulado en el capítulo 9, artículos 126 al 129 del reglamento estudiantil de pregrado de la UIS.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Elaborar un estudio económico comparativo de los diferentes sistemas de puesta a tierra para la Línea de Transmisión El Morro –Yopal a 115 kV, analizando económicamente los diferentes sistemas de puesta a tierra existentes en el mercado para líneas de transmisión y determinando su viabilidad económica para el proyecto.

1. MARCO TEÓRICO

La información que se presenta a continuación, busca ayudar a comprender la función primordial que cumplen los sistemas de puesta a tierra en las líneas de transmisión y la estructura general de los mismos.

1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL A LA PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE POTENCIA CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.

La mayoría de las líneas de transmisión y distribución de alta tensión están instaladas sobre torres enrejadas de acero. Debido a la longitud de estas líneas, si penetran en una zona con alto nivel cerámico, son susceptibles de recibir impactos de rayo directos y efectos inducidos debido a la caída de rayos en la vecindad o a descargas entre nubes. Para dar la protección adecuada, se incorpora un cable de tierra sobre los conductores.

Este cable está puesto a tierra al comienzo y al término de cada línea y en todas las posiciones de soporte. En general, el electrodo de tierra en el punto de soporte está formado por las patas de acero de la torre, enterradas en concreto en el suelo.

Si un rayo impacta una torre, entonces parte de la corriente asociada será derivada a tierra por la base de la torre y otra parte viajará a las torres adyacentes a través del cable de tierra aéreo. El voltaje que aparece en la torre puede ser suficiente en algunos casos para superar el tensión de ruptura de los aisladores de la línea y ocurrirá el flameo inverso (*back flashover*) desde la torre a los conductores de fase. A menudo a esta descarga le seguirá una descarga de frecuencia de potencia.

Cuando la tensión supera un determinado valor, el espacio de aire entre ambos se rompe eléctricamente y deriva al sistema de puesta a tierra la energía asociada con la descarga.

1.2 EFECTOS DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA.

1.2.1 Origen de la descarga atmosférica. En general, se puede establecer que los rayos son producidos en un intento de la naturaleza por mantener un balance dinámico entre las cargas positivas de la ionosfera y las cargas negativas de tierra.

Una de las teorías más aceptadas, es la de "Schonland", según la cual el ciclo de la nube de tormenta y la consecuente descarga denominada rayo, se puede resumir de la siguiente manera:

a.- Las cargas eléctricas en la nube se encuentran distribuidas en forma no homogénea, existiendo por consiguiente concentraciones desiguales de carga en el seno de la misma.

Alrededor del 90 % de las descargas son de carácter negativo.

b.- Una vez que el gradiente eléctrico sobrepasa el valor crítico, comienzan a ocurrir pequeñas descargas en el seno de la nube. Estas, en virtud de la ionización por choque en el aire, van degenerando en una forma de avalancha, denominada "Pilot Streamer" o descarga piloto, la cual avanza a una velocidad promedio de 150 km/s.

c.- La rama de la descarga piloto orientada hacia la tierra logra imponerse en su crecimiento, viéndose acompañada de pequeños puntos luminosos característicos de las descargas escalonadas "Stepped Leaders". Durante este proceso, la

luminosidad es baja y la corriente no excede de unos pocos amperios.

Las descargas escalonadas parecen tener su origen en la acción del viento, llegando raras veces a tierra; esto se debe a que la intermitencia de la descarga piloto (de 30 a 90 μs) les sustrae la energía necesaria para tales fines. Esta etapa ocurre a mucha mayor velocidad (aproximadamente a un 3% de la velocidad de la luz). El incremento del gradiente eléctrico de la tierra al aproximarse la descarga a ésta, favorece a la formación de un canal de recepción; dicho canal muchas veces puede ser distinto al suelo, es decir, que puede ser un objeto el causante del canal de recepción "Upward Streamer", y es de notar que rara vez dicho canal supera los 30 metros de altura.

d.- El canal de recepción sale entonces al encuentro de la descarga piloto, la cual trae una gran cantidad de cargas negativas (positivas muy pocas veces), formándose así un canal plasmático.

Para neutralizar la carga en la nube, una gran cantidad de cargas opuestas salen de tierra utilizando el mismo canal previamente ionizado. A través del canal plasmático ocurrirán todas las descargas sucesivas, de las cuales la primera es la denominada de retorno o "Return Stroke".

La velocidad de propagación de ésta descarga es aproximadamente 10% de la velocidad de la luz, lo cual causa que sea apreciable el valor de la intensidad de corriente que puede alcanzar valores de hasta 160 kA. Mientras la descarga principal requiere de un tiempo aproximado de 20 ms para llegar a tierra, la descarga de retorno acusa un tiempo promedio de 100 μs . La forma de onda de la corriente del "Return Stroke", es determinada por la rata de descarga del canal plasmático, la cual es función de la velocidad del retorno y de la distribución de las cargas a lo largo del canal.

e.- El impacto provocado por las cargas eléctricas que la descarga de retorno introduce en el seno de la nube es tan fuerte, que en la mayoría de los casos origina una segunda descarga orientada hacia tierra, denominada descarga secundaria o "Dart Leader", con una velocidad promedio del 1% de la velocidad de la luz.

Este par de fenómenos (Return Stroke/Dart leader), puede repetirse un número de veces apreciable y esto se denomina descargas sucesivas o "Múltiple Stroke", que consisten en descargas separadas que utilizan el mismo canal plasmático. Cerca del 50% de las descargas que ocurren son múltiples y el intervalo de tiempo entre descargas, va desde 0,5 ms, hasta 0,5 s.

1.2.2 Parámetros que caracterizan la descarga atmosférica.

1.2.2.1 Múltiples descargas:

- 55% poseen descargas sucesivas
- 90% no exceden de 8 descargas
- Media: 3 descargas/rayo

1.2.2.2 Intensidad y polaridad de la corriente de descarga. La magnitud de la descarga no depende de las características del punto de terminación, ya que la resistencia propia del canal plasmático es superior (en el orden de los miles de Ohm) a la propia de la terminación.

Media: 31 kA.

Media para descargas sucesivas: 12 kA.

La distribución acumulada, puede ser aproximada por la siguiente función:

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2,6}} \quad \text{Ec. 1.}$$

Donde: I es la Corriente en kA

Solo el 10% de las descargas son de polaridad positiva.

1.2.2.3 Forma de onda de la descarga atmosférica. Una forma de representar a una onda de descarga atmosférica es por la tasa de crecimiento de ésta, hasta alcanzar el valor pico (kA/s).

La distribución acumulada, puede ser aproximada por la siguiente función:

$$P(S) = \frac{1}{1 + \left(\frac{S}{24}\right)^4} \quad \text{Ec. 2.}$$

Donde S es la tasa de crecimiento en kA/μs.

1.2.2.4 Ángulo de Incidencia de la Descarga. Es el ángulo con el cual incide la descarga con cualquier punto terminal, respecto a la línea vertical.

Considerar que todos los rayos inciden verticalmente, introduce algunos errores en el cálculo de la tasa de salida, sobre todo en el cálculo del apantallamiento de las líneas aéreas.

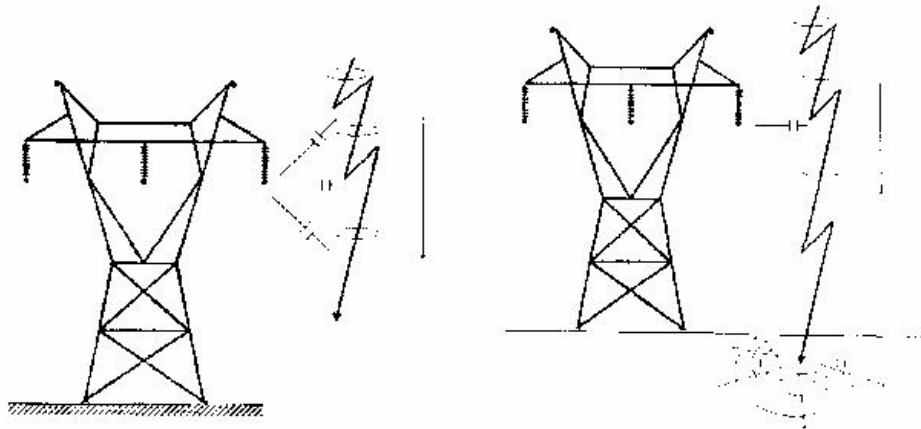
La probabilidad $P(\theta)$, de ocurrencia de un ángulo de inclinación se puede expresar como:

$$P(\theta) = \frac{4}{\pi} * \int_{\theta}^{\pi/2} \cos^2 \theta d\theta$$

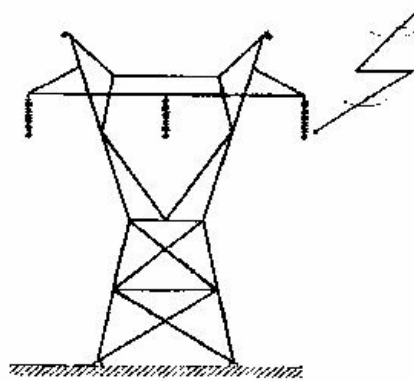
Ec. 3.

1.2.2.5 Forma de incidir sobre las líneas de Transmisión o Distribución:

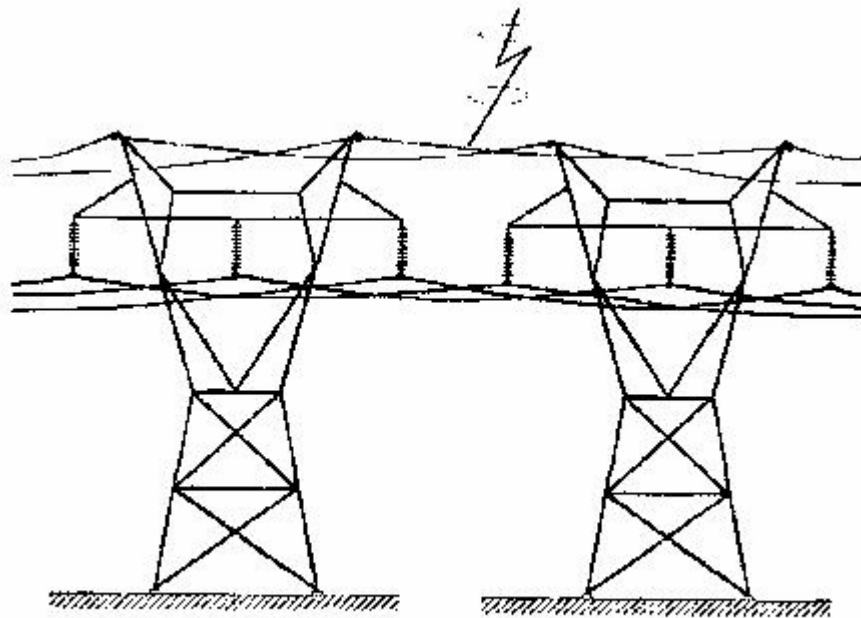
Figura 1. Forma de incidencia de las descargas sobre las líneas de transmisión.



Indirectamente. Por inducción.



Sobre un conductor de fase.



Sobre el conductor de protección (guarda).

1.2.3 Sobretensiones inducidas por descargas atmosféricas en las cercanías de la línea. Son especialmente dañinas en sistemas de media tensión, ya que sus valores pico son generalmente superiores a los valores de aislamiento de estos sistemas. Sin embargo, los daños dejan de ser considerables para tensiones superiores a 69 kV.

La tensión inducida en una línea aérea, tiene cuatro componentes:

- a.- La nube cargada sobre la línea de transmisión induce limitadas cargas sobre dicha línea, mientras ésta se encuentra electrostáticamente al potencial de tierra.
- b.- Las cargas debidas a los “stepped leaders”, cumplen con el mismo proceso descrito en a.
- c.- Las cargas durante la descarga de retorno, inducen un campo electrostático en la vecindad de la línea, el cual a su vez induce tensiones en la línea.
- d.- La rata de cambio de la corriente de la descarga de retorno, produce una inducción magnética sobre la línea.

1.2.4 Parámetros que influyen en la magnitud de la tensión inducida.

1.2.4.1 Velocidad de la descarga de retorno “Return Stroke”. La tensión inducida se incrementa a medida que disminuye la velocidad de la onda de descarga de retorno.

1.2.4.2 Tiempo de frente de la tensión de retorno. La tensión inducida se incrementa a medida que es menor el tiempo de frente de la onda de descarga de retorno.

1.2.4.3 Cable de guarda. El cable de guarda atenúa significativamente la tensión inducida en los conductores de fase.

1.2.4.4 Resistividad del terreno. A medida que es mayor la resistividad del terreno, se incrementa la tensión inducida sobre el circuito.

1.2.5 Alternativas para disminuir su influencia.

- Existencia de conductor de guarda (o neutro)
- Aumentar la distancia entre conductor de guarda y conductor de fase
- Baja resistencia de puesta a tierra del conductor de guarda (o neutro)

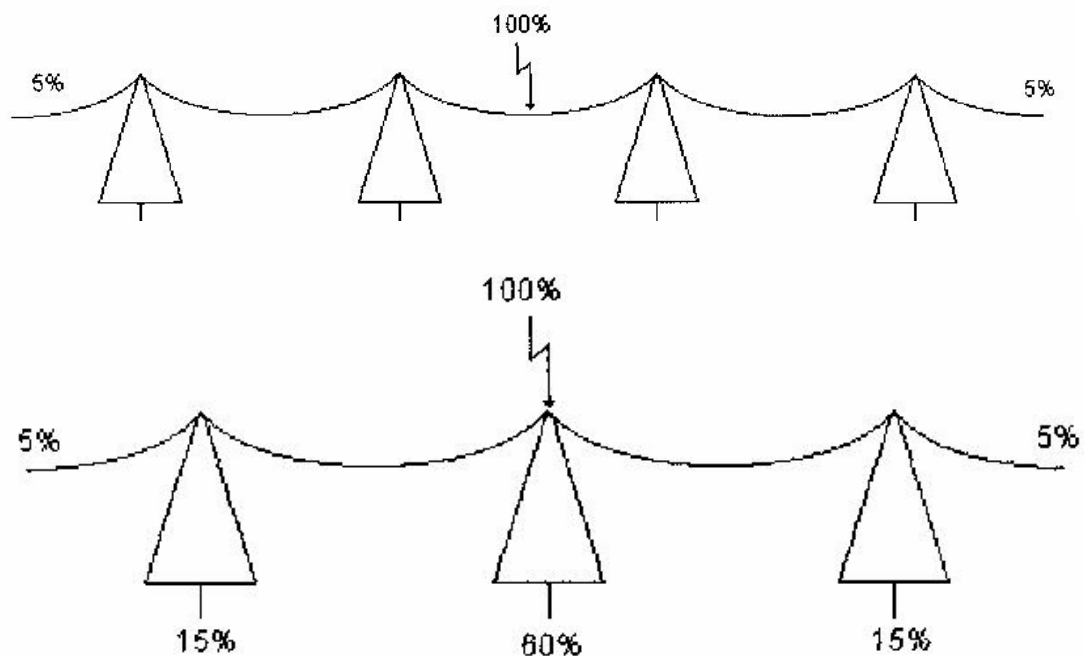
1.2.6 Descargas Retroactivas (Descargas directas sobre postes, torres o cables de guarda). El cálculo de las sobretensiones que se generan tras la incidencia de una descarga en el poste o en alguno de los cables de guarda, implica la solución de un fenómeno de onda viajera que toma en cuenta diversos parámetros del sistema en cuestión.

Por lo tanto son necesarios los siguientes datos:

- Impedancias de onda del o de los cables de guarda
- Impedancia de onda del poste utilizado
- Impedancias dinámicas de puesta a tierra
- Existencia o no de algún componente adicional que pueda afectar en forma y magnitud a la onda viajera (descargadores de sobretensiones, capacitores, transformadores, etc.)
- Factor de acoplamiento entre cables de guarda y conductores de fase
- Tensión de 60 Hz a la cual está operando el sistema
- Cantidad de descargas que van a incidir por año, sobre cables de guarda o postes

La descarga atmosférica puede incidir tanto en una estructura, como en cualquier punto del cable de guarda a lo largo del vano; el caso en el cual por la torre se drena mayor cantidad de corriente, es aquel en el cual el rayo incide directamente sobre la estructura.

Figura 2. Posibilidades de incidencia de las descargas sobre las líneas de transmisión.



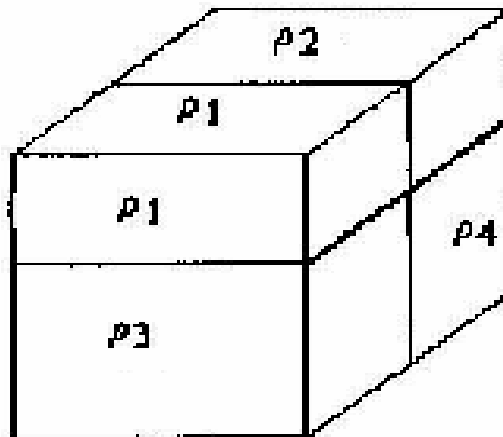
1.2.7 Efectos de la resistencia de puesta a tierra. La resistencia de puesta a tierra de las estructuras, es un parámetro de suma importancia en la determinación de las sobretensiones atmosféricas sobre las líneas.

La sensibilidad al valor de la resistencia de puesta a tierra que presenta la probabilidad de ruptura debido a sobretensiones de retorno es muy alta; por ello la especial atención que se le debe prestar a este parámetro de diseño.

1.2.7.1 Comportamiento del suelo. El suelo está conformado por capas o estratos, tanto horizontales como verticales, cada uno de los cuales puede poseer diferentes valores de resistividad.

Diferentes métodos existen para la medición y cálculo tanto de la cantidad de estratos como de sus valores de resistividad.

Figura 3. Estratificación del suelo.

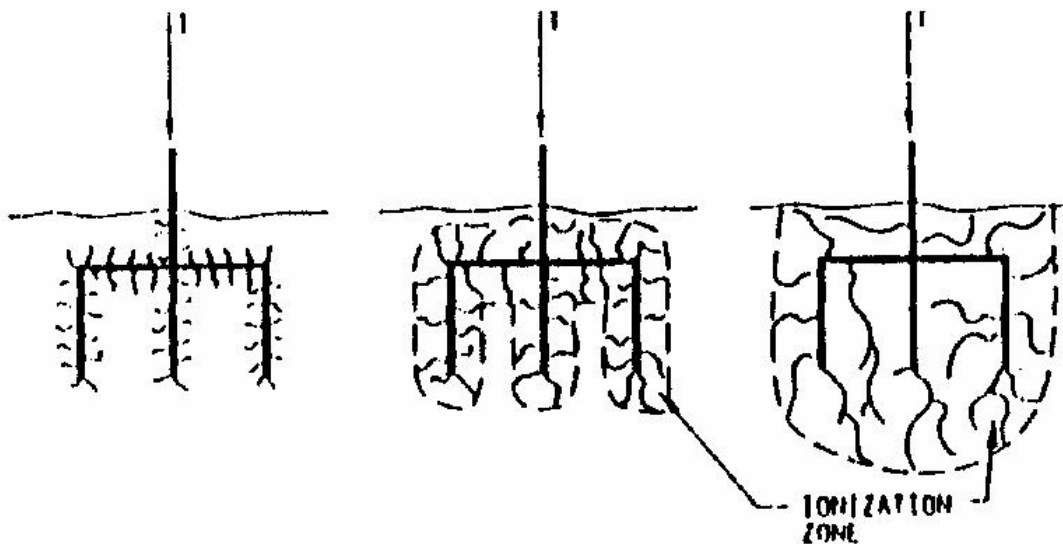


Sin embargo, suelen despreciarse los estratos horizontales, ya que estos estratos son más largos y uniformes.

Ante una descarga atmosférica, son grandes las densidades de corriente que fluyen hacia el suelo, si el gradiente eléctrico es excedido, romperá. Esto causará que el suelo sea rodeado por un cilindro con un patrón de descarga tipo corona, a lo largo de la longitud del electrodo.

Figura 4. Ionización del suelo.

$$E_{\text{CRITICO}} = 241 \bullet \left(\frac{1}{\rho} \right)^{-0.215} \quad (\text{kV/m}) \quad \text{Ec. 4.}$$

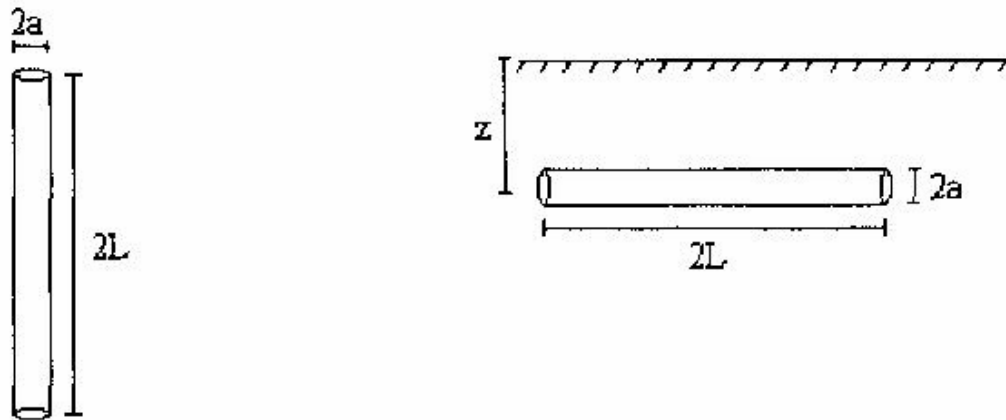


Resistencia a 60 Hz. Esta es la resistencia medida a baja frecuencia y baja corriente.

Depende de la configuración geométrica de los electrodos y de la resistividad del terreno en el cual se encuentran.

En el caso de estructuras, las configuraciones más típicamente utilizadas son, las barras enterradas verticalmente o jabalinas y el conductor enterrado horizontalmente o contrapeso.

Figura 5. Resistencia a 60 Hz.



$$R = \frac{\rho}{4\pi L} \operatorname{Ln} \left(\frac{2L}{a} \right) \qquad R = \frac{\rho}{4\pi L} \operatorname{Ln} \left(\frac{2L}{a} \right) \left[1 + \frac{\operatorname{Ln} \left(\frac{L}{z} \right)}{\operatorname{Ln} \left(\frac{2L}{a} \right)} \right]$$

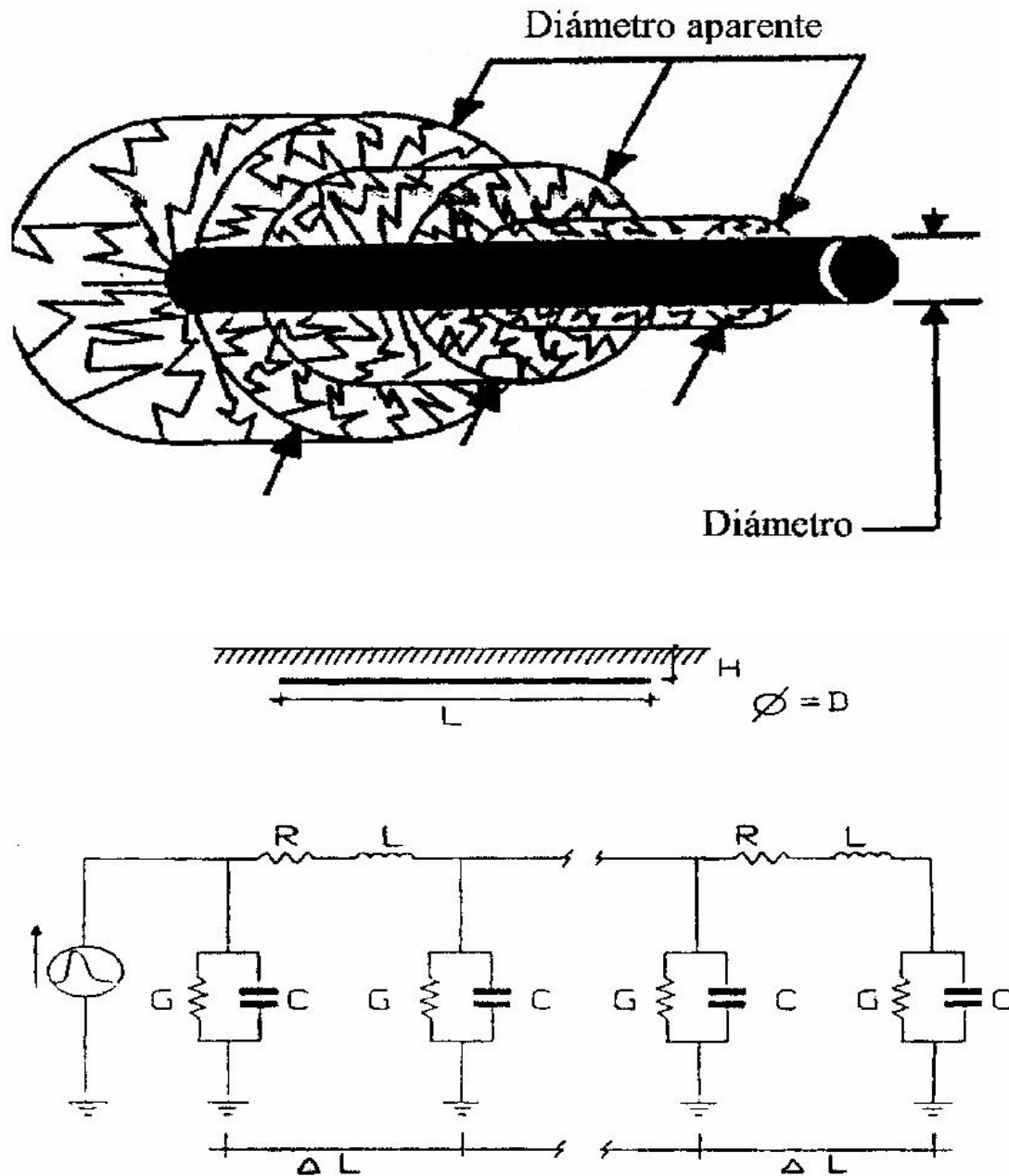
ρ : Resistividad del Terreno

1.2.7.2 Impedancia de tierra ante impulsos de corriente

Contrapesos (electrodos horizontales). Este tipo de electrodos suele ser de larga longitud (>20 metros), por lo cual poseen un tiempo de viaje e inclusive una variación de la ionización del terreno a lo largo de su longitud.

El modelo más utilizado, para casos prácticos, es el de la línea de transmisión, donde los parámetros de los componentes de esta dependen de las características del suelo (permitividad, resistividad).

Figura 6. Modelamiento de los contrapesos.



Jabalinas (electrodos verticales). Para las puestas a tierra concentradas, como las jabalinas, el tiempo de respuesta puede desprejarse, y la resistencia en función de la corriente se puede calcular según la expresión:

$$R_T = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_i}}} \quad \text{Ec. 5.}$$

Donde

R_0 = Resistencia del pie de torre para baja corriente y baja frecuencia (.)

I_i = Intensidad de corriente para la cual se inicia la ionización

I = Corriente de descarga a través de la puesta a tierra (A).

La corriente límite para la cual se inicia la ionización es función de la resistividad del terreno y puede calcularse por:

$$I_i = \frac{1}{2\pi} * \frac{E_{crit}}{\rho} \quad \text{Ec. 6.}$$

Donde:

ρ = Resistividad del terreno (Ω -m)

E_{CRIT} = Gradiente de ionización

1.3 RESISTIVIDAD DEL TERRENO

Como se veía anteriormente, la resistividad del terreno, es uno de los parámetros que influyen en la magnitud de la tensión inducida, producida por las descargas atmosféricas, y una de las alternativas para disminuir su influencia es la baja resistencia de puesta a tierra del conductor de guarda.

Por lo cual es importante como parte del diseño del sistema de puesta a tierra, analizar el tipo de suelo. La conductividad del terreno varía con la composición de éste, por lo tanto un suelo arenoso no tiene tanta conductividad como un suelo fértil.

La resistividad del suelo es modificada por muchos valores, entre los factores más importantes están:

1. La composición.
2. Humedad y concentración de sales
3. Temperatura
4. Compacidad y granulometría.
5. Estratigrafía.

1.3.1 La composición. La variación de la resistividad del terreno está en virtud de la composición de los suelos, por tal motivo es necesario determinar su composición y concentración para efectuar la toma a tierra; la tabla 1 muestra los valores promedio de estas resistividades y sirve como referencia para estimar tales mediciones.

Tabla 1. Valores medios de resistividad según la composición del terreno.

NATURALEZA DEL TERRENO	VALOR MEDIO DE LA RESISTIVIDAD EN Ω.m
Tierra pantanosa	50
Tierra arcillosa húmeda	500
Tierra arcillo-arenosa húmeda	200
Tierra arenosa seca	1000
Tierra de arenisca dura	2000
Suelo con estrato de roca	10000

Fuente: Instrucciones técnicas complementarias (ITC) del reglamento AT -2003.

1.3.2 Humedad y concentración de sales. Los electrolitos formados por sales y agua contenidos en el terreno, son esencialmente los medios de conducción de corriente en el terreno. La cantidad de sales disueltas afectan la resistividad del terreno; en consecuencia el grado de humedad del terreno influye, de forma notable en su resistividad.

1.3.3 Temperatura. La resistividad del terreno aumenta a medida que desciende la temperatura a valores cercanos a 0°C, debido a que afecta el movimiento de los electrolitos, así mismo temperaturas elevadas (cerca de los 100°C) disminuye la humedad del terreno y por tanto aumenta la resistividad.

1.3.4 Compacidad y granulometría. Al aumentar el tamaño de los granos y disminuir el grado de compactación del terreno, se incrementa la resistividad. Para disminuir la resistividad se recomienda utilizar alrededor del electrodo tierra fina e ir compactando el terreno cuidadosamente.

1.3.5 Estratigrafía. La composición del suelo es generalmente estratificada en varias capas (generalmente de diferentes resistividades). En consecuencia la resistividad del terreno es la resultante de las correspondientes capas que la constituyen.

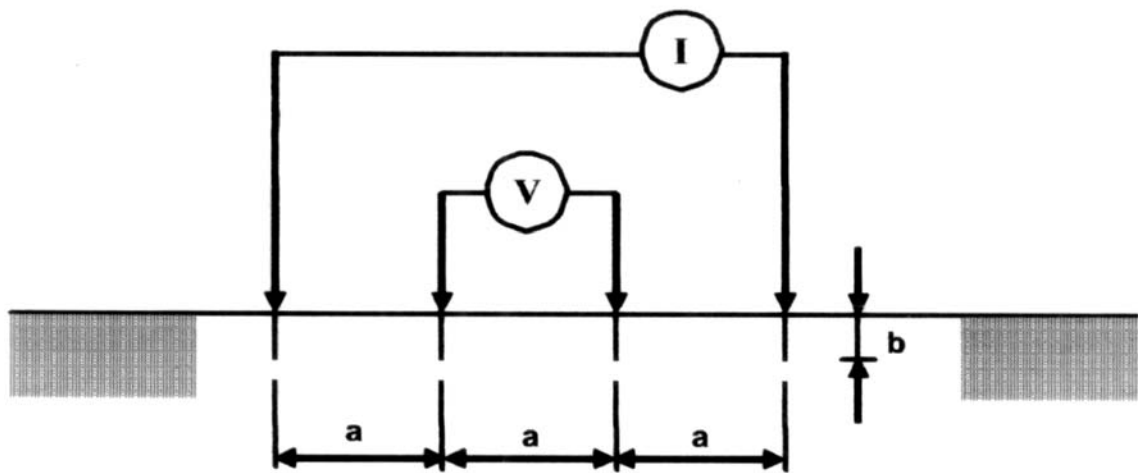
1.4. MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.

La sección del conductor, la superficie de contacto y la resistividad del terreno son los tres factores más importantes en la construcción de un buen sistema de puesta a tierra. La resistividad del suelo no es uniforme y tiene múltiples variantes de acuerdo a las capas heterogéneas que lo componen; como se mencionó anteriormente y la conclusión que se obtiene es que el único camino viable para conocer el valor de la resistividad del terreno es medirlo.

Existen muchos métodos para medir la resistividad del terreno, entre ellos el método de los cuatro electrodos, de Schumberger o de gradiente, de Palmer, de Wenner, de Lee; pero el método que posee gran aceptación, ya que es de mucha utilidad en diseños eléctricos es el método de Wenner.

1.4.1 Método de Wenner. En el método de Wenner los electrodos se disponen en línea recta y equidistantes a una distancia “a”, simétricamente respecto al punto que se desea medir (véase la figura 7).

Figura 7. Método de Wenner.



La ecuación para el cálculo es:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{\left(1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right)} \quad [\Omega\text{-m}] \quad \text{Ec. 7.}$$

ρ = Resistividad aparente del suelo en ohmios metro

a = Distancia entre electrodos adyacentes en metros

b = profundidad de enterramiento de los electrodos en metros

R = resistencia eléctrica medida en ohmios, calculada como V/I

Los electrodos externos son los electrodos de corriente y los internos son los electrodos de potencial.

El eje de medida de resistividad se encuentra en medio de los electrodos de potencia y la profundidad de la exploración se puede admitir en forma práctica que es básicamente la de las capas comprendidas entre la superficie del suelo y la profundidad a la cual la densidad de corriente se ha reducido a la mitad de su valor en la superficie, siendo esta profundidad de investigación, h , comprendida entre “ a ” y “ $0,75$ ”.

Cuando b es muy pequeño comparado con a la ecuación queda simplificada en:

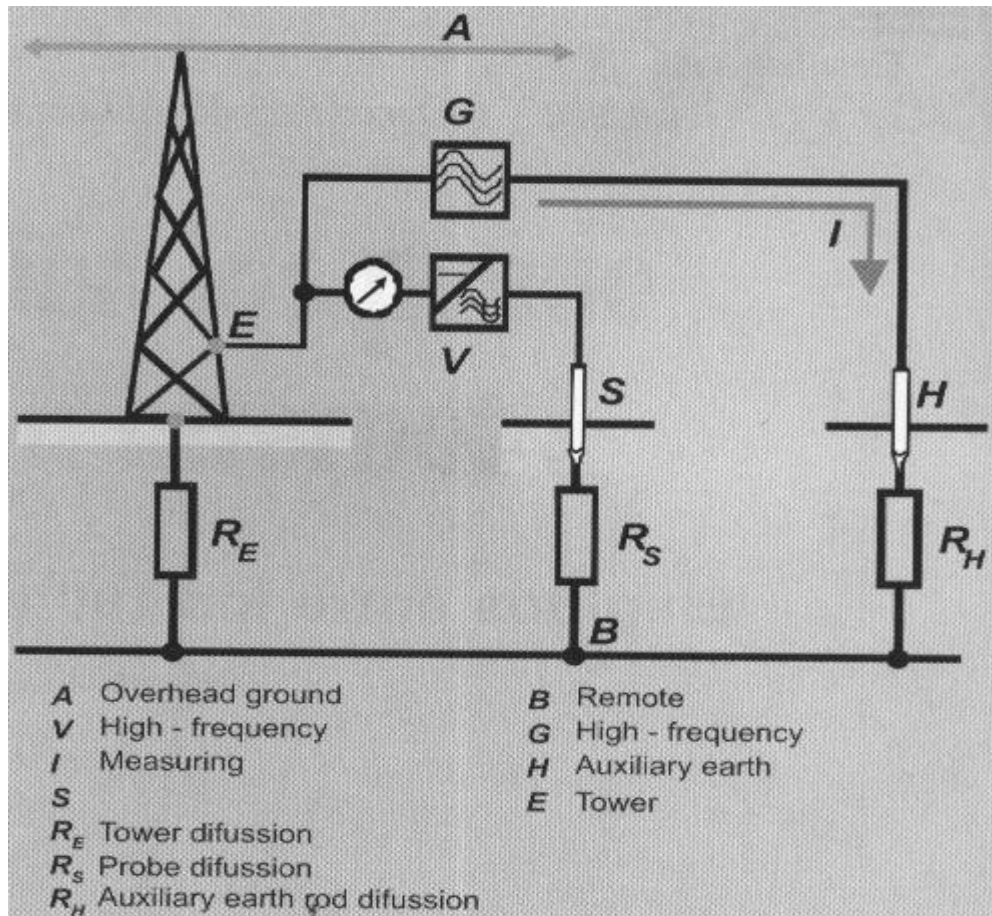
$$\rho = 2\pi aR \quad [\Omega\text{-m}] \quad \text{Ec. 8.}$$

1.5 MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

La norma IEEE 81 – 1983 en su numeral 12.6 sugiere que la medida de la resistencia de puesta a tierra en líneas de transmisión, debería ser implementada con un medidor de resistencia de puesta a tierra de alta frecuencia el cual opera a 25 kHz.

La figura 8 muestra el método sugerido por la IEEE con un medidor de resistencia de puesta a tierra de alta frecuencia (25 kHz) y la aplicación de la regla del 62%.

Figura 8. Método de medida sugerido por la IEEE.



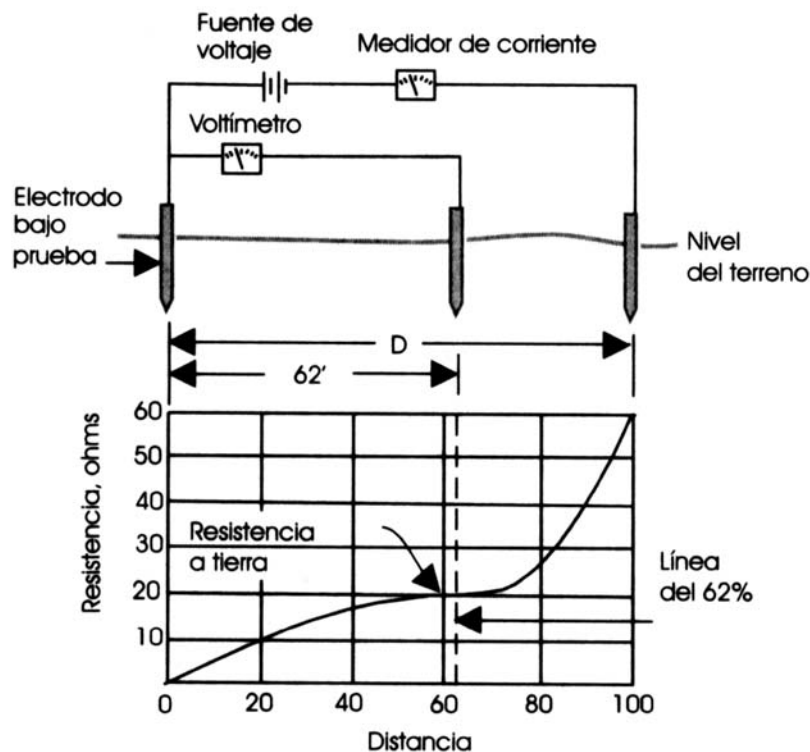
Este método requiere de dos electrodos auxiliares que son fijados y enterrados a 90 grados de las líneas aéreas. Esta recomendación esta dada para evitar un acoplamiento con el sistema de puesta a tierra bajo prueba. El medidor de puesta a tierra inyecta corriente en un de los electrodos, este es llamado "Electrodo de corriente", el electrodo esta fijado a lo lejos del sistema de puesta a tierra, el electrodo intermedio esta localizado al 61,8 % de la distancia entre el sistema de puesta a tierra y el electrodo de corriente, este electrodo mide la elevación del potencial y es llamado "Electrodo de prueba".

La precisión esta condicionada por la no interacción de ambos electrodos (garantizado usando una tierra lejana) y la localización del electrodo intermedio en

el valle de la curva, el número de medidas (mínimo tres) y las características del medidor de puesta a tierra. La medida de la resistencia de puesta a tierra puede realizarse también con un medidor de puesta a tierra de baja frecuencia, usando el método de la caída de potencial.

1.5.1 Método de la caída de potencial. La figura 9 muestra la disposición del montaje para la medición de la resistencia de puesta a tierra y la gráfica muestra la curva de la medida resistencia a tierra, que se presente al variar la distancia del electrodo de tensión, se puede observar que existe una zona de potencial plano equivalente a un valor constante de resistencia. Ese es, por tanto, el verdadero valor de una resistencia de puesta a tierra. Este valor se encuentra con el electrodo de tensión al 62% del electrodo de corriente.

Figura 9. Método de la caída de potencial o método del 62%.



1.6 EL MÉTODO ARTIFICIAL PARA REDUCIR LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

El problema de lograr una resistencia baja en la roca así como en otros suelos de alta resistividad, está asociada con el material en contacto con el electrodo y la compactación que éste recibe al rellenar el agujero.

El relleno ideal debe compactarse fácilmente, debe ser no corrosivo y a la vez buen conductor eléctrico.

En libros antiguos sobre puesta a tierra (década del 1930) se sugiere algunas veces que la resistencia a tierra de los electrodos se reduzca hasta un 90% por tratamiento químico. Los elementos químicos recomendados y usados tradicionalmente fueron cloruro de sodio (sal común), sulfato de magnesio (sales de Epsom), sulfato de cobre, bicarbonato de sodio (soda de lavar) y cloruro de calcio. En la mayoría de los casos se usaron los elementos químicos más baratos. Se esparcían en torno a los electrodos y se disolvían agregando agua antes del relleno o se dejaba que el flujo de agua natural (lluvia, etc.) los disolviera. Los elementos químicos tienen el efecto de reducir la resistividad del suelo circundante.

La nueva resistividad puede bajar a $0,2 \Omega$ -m usando bicarbonato de sodio o a $0,1 \Omega$ -m usando sal común. No es necesaria una concentración particularmente alta de sales disueltas para ver una reducción apreciable en la resistividad, por ejemplo:

- 1,2 gramos/litro de sal común en agua destilada tiene una resistividad de 5Ω -m
- 6 gramos/litro de bicarbonato de sodio en agua destilada tiene una resistividad de 10Ω -m

Esta reducción en la resistividad del terreno reducirá a su vez la impedancia del sistema de electrodos. El grado de mejoramiento depende principalmente del valor de resistividad original del terreno, de su estructura y del tamaño del sistema de electrodos. Sin embargo, ya que los elementos químicos usados se eligen debido a que son solubles, continuarán diluyéndose progresivamente por agua de lluvia o movimiento de agua a través del área. La resistividad del suelo entonces aumentará, hasta eventualmente retornar a su valor original.

Este hecho es reconocido y el tiempo para que esto ocurra a veces es de pocos meses. Se recomendó mantenimiento regular y reaprovisionamiento de los elementos químicos diluidos y algunas veces se suministró un buzón de relleno donde colocar estos elementos. En algún tiempo se hizo práctica en unos establecimientos agregar elementos químicos justo antes de una medida de prueba anual, pero esto no ayuda a que el sistema de puesta a tierra cumpla su función correctamente durante el resto del año, cuando pueda ser llamado a intervenir por una corriente de falla.

Además del costo de mantenimiento, debe considerarse el impacto en el ambiente local y esto puede entrar en conflicto con legislación de protección del ambiente. Algunos de los elementos químicos usados (tal como la sal) se sabe que causan rápida corrosión a los mismos electrodos -particularmente al acero, reduciendo así la vida útil de la instalación. En realidad, en algunos de los antiguos arreglos, se reconoció este riesgo y se colocó un tubo alrededor de algunas partes del electrodo para protegerlo, reduciendo de este modo su efectividad.

Los elementos químicos necesitan extender el volumen efectivo del electrodo en forma significativa para tener un efecto notable. Ya que como se sabe, existe una resistencia de contacto entre el electrodo y el suelo.

Derramando una mezcla de sustancias químicas y de tierra en el área alrededor

del electrodo se obtendrá una reducción inmediata y significativa en la resistencia de la barra. Sin embargo, su resistencia podría reducirse de todas maneras cuando se consolide el suelo alrededor debido a riego, lluvia, etc. Un modo más aceptable ambientalmente para acelerar este efecto es agregar un material de baja resistividad, cuando la barra se está enterrando. A medida que el electrodo de tierra penetra el suelo, la Bentonita es empujada hacia abajo por la barra. Agregar materiales de baja resistividad, en una zanja o en una perforación de sección mayor que el electrodo, tiene el efecto de incrementar el área superficial del electrodo de tierra, suponiendo que la resistividad del material agregado es menor que la del terreno circundante.

1.6.1 MATERIALES ACEPTABLES DE BAJA RESISTIVIDAD

1.6.1.1 Bentonita. Es una arcilla color pardo, de formación natural, que es levemente ácida, con un pH de 10,5. Puede absorber casi cinco veces su peso de agua y de este modo, expandirse hasta treinta veces su volumen seco. Su nombre químico es montmorillonita sódica. En terreno, puede absorber humedad del suelo circundante y ésta es la principal razón para usarla, ya que esta propiedad ayuda a estabilizar la impedancia del electrodo a lo largo del año. Tiene baja resistividad - aproximadamente 5 ohm - metro y no es corrosiva. Bajo condiciones extremadamente secas, la mezcla puede resquebrajarse ofreciendo así poco contacto con el electrodo. La Bentonita es de carácter tixotrópica y por lo tanto se encuentra en forma de gel en estado inerte. La Bentonita se usa más a menudo como material de relleno al enterrar barras profundas. Se compacta fácilmente y se adhiere fuertemente.

1.6.1.2 Marconita. Es esencialmente un concreto conductivo en el cual un agregado carbonáceo reemplaza el agregado normal usado en la mezcla del concreto. Tiene algunas propiedades similares a la bentonita, es decir, provoca poca corrosión con ciertos metales y tiene baja resistividad. Fue desarrollada

como un proceso que se inició en 1962 cuando ingenieros de Marconi descubrieron un material que conducía por movimiento de electrones más bien que de iones.

Contiene una forma cristalina de carbón y el material global tiene bajo contenido de sulfato y cloruro.

Se ha declarado que hay algo de corrosión de materiales ferrosos y de cobre mientras la Marconita está en forma ligosa, pero también se ha sugerido que forma una capa protectora delgada. Cuando el concreto ha fraguado, se dice que la corrosión cesa. Idealmente, en el punto de ingreso a la estructura Marconita, el metal debe pintarse con bitumen o una pintura bitumástica para prevenir la corrosión en ese punto. El aluminio, el acero galvanizado o con una capa de estaño, no deben instalarse en Marconita.

Cuando la Marconita se mezcla con concreto, su resistividad puede bajar tanto como a 0,1 ohm-metro. Mantiene su humedad aún bajo condiciones muy secas, de modo que ha sido usada en los climas más cálidos como una alternativa a la Bentonita.

1.6.1.3 Yeso. Ocasionalmente, el sulfato de calcio (yeso) se usa como material de relleno, ya sea solo o mezclado con Bentonita o con el suelo natural del área. Tiene baja solubilidad, por lo tanto no se desprende fácilmente lavándolo y tiene baja resistividad (aproximadamente 5-10 ohm-metro en una solución saturada). Es virtualmente neutro, con un valor de pH entre 6,2 y 6,9. Se presenta en la naturaleza en forma natural, de modo que su uso generalmente no provoca dificultades ambientales. Se asegura que no causa corrosión con el cobre, aunque algunas veces el pequeño contenido de SO_3 ha causado preocupación por su impacto en estructuras de concreto y fundaciones (cimientos).

Es relativamente barato y normalmente se mezcla con el terreno para formar un relleno alrededor del electrodo de tierra.

Se asegura que ayuda a mantener una resistividad relativamente baja durante un largo período de tiempo, en áreas donde las sales existentes en la vecindad se disuelvan rápido por movimiento de agua (lluvia, etc.). Sin embargo, el hecho de que el material no se disuelva fácilmente moderará los beneficios obtenidos, ya que no penetrará difundiéndose en la tierra. Esto significa que el efecto beneficioso estará localizado digamos en una área excavada en torno a un electrodo enterrado. Esto a su vez significa que la reducción en el valor de la resistencia del electrodo no será dramática, pero será razonablemente sustentable.

2. DESARROLLO DEL TEMA EN LA PRÁCTICA EMPRESARIAL

2.1 PLANTEAMIENTO DEL TEMA

Dentro de la ejecución del proyecto, se encuentra la construcción del sistema de puesta a tierra para las torres de la línea de transmisión. Al llevar a cabo esta construcción bajo el diseño establecido y tomar las medidas de la resistencia de puesta a tierra de las torres de la línea de transmisión, se encuentra que varias de ellas no cumplen con la medida requerida por las especificaciones técnicas establecidas, por lo cual surge la necesidad de realizar un estudio para la reducción del valor de puesta a tierra de las torres de la línea de transmisión.

Con base en los resultados obtenidos de este estudio se presentarán alternativas para la selección del sistema de puesta a tierra, que brinde una solución técnica / económica al problema antes señalado.

El objetivo final es el de seleccionar el sistema de puesta a tierra, que además de cumplir con la viabilidad económica, permita que todas las resistencias de puesta a tierra de las torres de la línea de transmisión, cumplan con la medida requerida.

3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS REQUERIDAS PARA LA PUESTA A TIERRA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.

3.1 GENERALIDADES

Como empresa contratista J. E. Jaimes Ingenieros debe proveer toda la mano de obra, materiales y equipo requerido para medir la resistividad del terreno en el sitio de cada estructura, para medir la resistencia a tierra de las estructuras y para instalar los sistemas de puesta a tierra.

3.2 MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

Durante el replanteo y localización de la estaca central de cada estructura, se debe medir la resistividad del terreno en ese sitio y suministrar a la Interventoría un informe que contenga lo siguiente:

- Catálogos técnicos y certificado de calibración del Meger
- Número de la estructura
- Fecha de la medición.
- Resistividad del suelo.
- Condición del suelo (húmedo o seco)
- Tipo de puesta a tierra recomendado.

3.3 MEDIDA DE LA RESISTENCIA

Una vez terminada la erección de cada estructura y antes de la instalación de los conductores e hilos de guardia, el Contratista debe medir la resistencia a tierra de las estructuras. El contratista debe presentar a la Interventoría por triplicado, un registro de todas las mediciones de resistencia a tierra que haya efectuado.

Si en las mediciones efectuadas se obtienen valores mayores a lo indicado en los planos, se instalarán conexiones a tierra adicionales para bajar la resistencia a tierra en la forma establecida en los planos.

La instalación de conexiones a tierra adicionales debe estar terminada antes de los 30 días siguientes a la fecha de las mediciones.

Después de terminada cada instalación adicional de puesta a tierra, el Contratista debe efectuar mediciones de resistencia a tierra para verificar que se ha obtenido la resistencia deseada. En casos excepcionales, cuando no pueda alcanzarse los límites de resistencia a tierra deseados, el Contratista debe notificar inmediatamente a la Interventoría.

Cada una de las torres deberá conectarse a tierra mediante cuatro (4) varillas conectadas a las patas mediante una puesta a tierra normal.

Se considera 20 ohmios o menos como valor aceptable para la resistencia de la puesta a tierra de cada una de las estructuras.

3.4 CONTRAPESOS

En caso de emplear contrapesos como solución a una medida de resistencia de puesta a tierra fuera del valor aceptable, los contrapesos deben instalarse, en lo posible, dentro de la zona de derecho de vía. La dirección de los contrapesos podrá modificarse hasta en 15 grados o volverse hacia atrás para esquivar obstrucciones, con tal que el radio de volteo no sea inferior a 25 cm y no queden a menos de 6 m de sí mismo y de cualquier parte de la torre. Todos los contrapesos deben quedar enterrados a 50 cm o más de la superficie natural del terreno en tierras arables o 30 cm en tierras no arables. En aquellos sitios donde se presenten afloraciones de roca, la interventoría podrá ordenar que los contrapesos

se instalen directamente sobre la superficie de la roca. En tal caso el contrapeso debe anclarse firmemente a intervalos de hasta 2 m. Todas las conexiones de contrapesos deben hacerse con acoples tipo abrazadera. El contratista debe efectuar la excavación y el relleno compactado sobre el contrapeso, anclar el contrapeso a la superficie de la roca y conectar el contrapeso a las estructuras.

3.5 VARILLAS PARA PUESTA A TIERRA

Las varillas para puesta a tierra serán de acero de alta resistencia, cubiertas de cobre y de sección circular, terminado en una punta cónica maquinada en uno de sus extremos y con un chaflán en el otro para montaje del respectivo conector varilla – cable. El cobre se aplicará de tal manera que se tenga una capa sellante a prueba de herrumbre entre el cobre y el núcleo de acero. La superficie exterior será lisa, continua y uniforme, con un espesor mínimo de cobre de 0,4445 mm.

Las varillas tendrán una resistencia mecánica a la tensión de 482 MPa (70000 psi) como mínimo y se suministrarán con un conector adecuado para conductor de cobre desnudo, con perno de cabeza hexagonal. Sus dimensiones serán de 16 mm (5/8”) por 1,8 m.

Las varillas de puesta a tierra deben localizarse al menos a 1,0 m. de la pata y en suelo del sitio. El cable de conexión debe enterrarse al menos a 50 cm. En terrenos rocosos las varillas de puesta a tierra deben hincarse o colocarse en agujeros y debe cementarse con lechada.

3.6 CABLES DE PUESTA A TIERRA

Los cables de conexión para varillas de puesta a tierra y contrapeso serán de cobre desnudo calibre No. 2 AWG. No se permitirá el empalme de los cables salvo

cuando autorice la Interventoría, en este caso el empalme será del tipo autofundente.

El conductor de cobre desnudo será cilíndrico, compacto, concéntrico, trenzado, formado con alambre cilíndrico sin revestimiento. Será construido con un núcleo central rodeado por una o mas capas de hilos compactos, cableado helicoidalmente y estará de acuerdo con lo especificado en la Norma “ASTM B-173 Estándar members for electrical conductors”.

4. DETALLE DE LA PUESTA A TIERRA

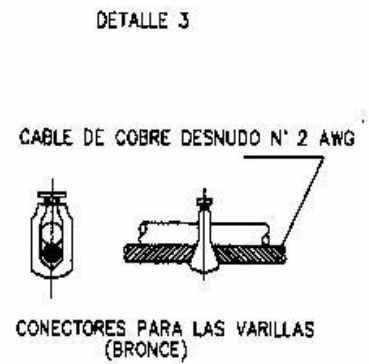
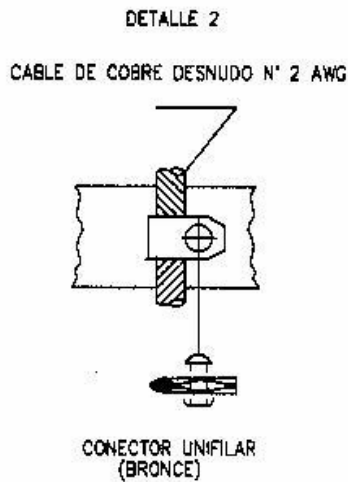
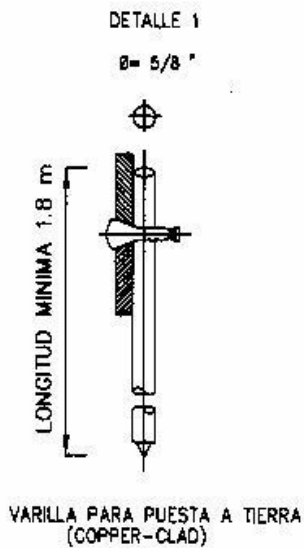
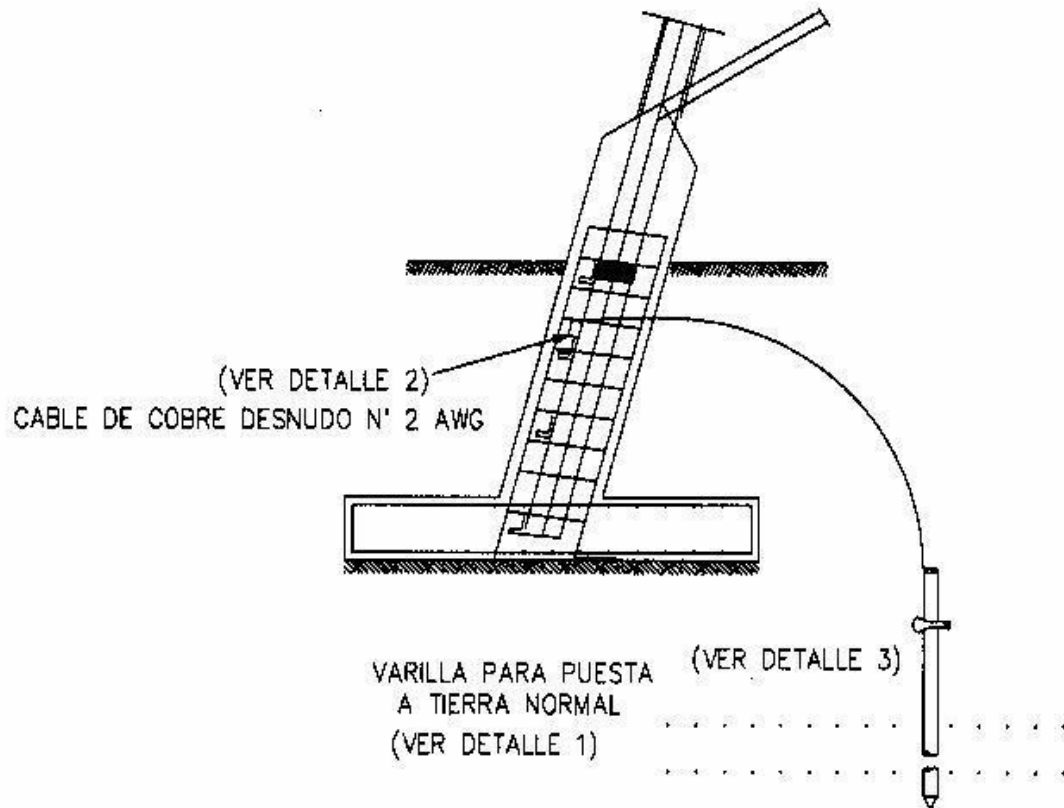
En la figura 10 observamos la puesta a tierra en detalle de una de las cuatro patas, correspondiente a una de las estructuras de la línea de transmisión.

En la figura se observan tres detalles que nos muestran los materiales que componen la puesta a tierra de las torres de la línea de transmisión.

El Morro Yopal, de acuerdo a las especificaciones técnicas dadas para la ejecución del proyecto, tales como:

- Varilla para puesta a tierra de diámetro 5/8" y longitud 1,8 m.
- Cable de cobre desnudo No 2 AWG.
- Conector unifilar.
- Conectores para las varillas.

Figura 10. Detalle de la puesta a tierra.



5. MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

5.1 RECURSOS TÉCNICOS

1. Telurómetro. Para la medición de la puesta a tierra y resistividad del terreno J.E. Jaimes cuenta con telurómetros digitales de la empresa HT Italia Ref. Geotest 2016, de las siguientes especificaciones técnicas:

a. Para medida de resistencia de puesta a tierra:

- Frecuencia 125 Hz / 75 Hz / 41,66 Hz +/- 1Hz
- Corriente de prueba ≤ 10 mA
- Tensión ≤ 25 Vrms
- Clase 2

Tabla 2. Rangos de resistencia del telurómetro Geotest 2016.

Rango automático(Ω)	Resolución(Ω)
0.01-19.99	0,01
20.0-199.9	0,1
200-1999	1

Fuente: HT Italia

b. Para medida de resistividad “ ρ ”

- Frecuencia 125 Hz / 75 Hz / 41,66 Hz +/- 1Hz
- Corriente de prueba ≤ 10 mA
- Tensión ≤ 25 Vrms
- Clase 2

Tabla 3. Rangos de resistividad del telurómetro Geotest 2016.

Rango automático(Ωm)	Resolución(Ωm)
0,6-125,6 Ωm	0,1 Ωm
0,125-1,256 $\text{k}\Omega\text{m}$	0,001 $\text{k}\Omega\text{m}$
1,25-19,99 $\text{k}\Omega\text{m}$	0,01 $\text{k}\Omega\text{m}$
20,0-199,9 $\text{k}\Omega\text{m}$	0,1 $\text{k}\Omega\text{m}$

Fuente: HT Italia

c. Accesorios. Estos equipos traen como accesorios:

- Cuatro picas
- Cuatro cables Banana-caimán
- Manual de instrucciones
- Certificado de calibración ISO 9000.

Figura 11. Telurómetro.

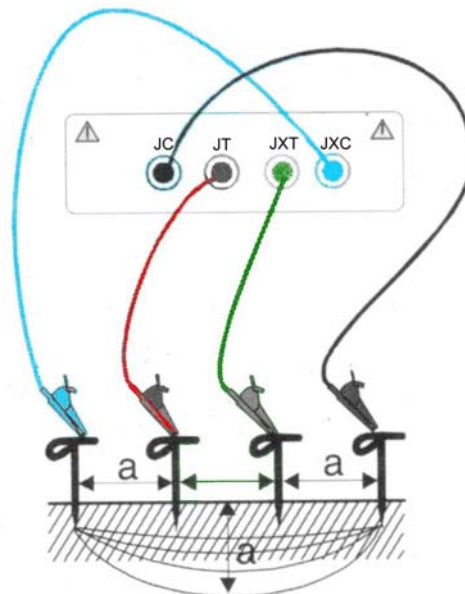


5.2 MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO (MÉTODO DE WENNER)

Con el telurómetro como equipo de medida, se entierran los cuatro electrodos o varillas, a una misma distancia “a” entre electrodos, con el punto donde posiblemente se instalará la puesta a tierra en medio de los dos electrodos de potencia y los electrodos de corriente se instalarán en los extremos.

La conexión de los cuatro electrodos se disponen en línea recta (véase figura 12), No se recomiendan distancias de separación entre electrodos mayores de 8 metros.

Figura 12. Método de Wenner



5.3 RESULTADOS DE LA MEDIDA DE RESISTIVIDAD

En el siguiente cuadro presentamos los resultados obtenidos, al medir la resistividad en cada uno de los sitios donde se encuentran localizadas las torres.

Tabla 4. Valores de resistividad del terreno.

TORRE	RESISTIVIDAD		PROMEDIO RESISTIVIDAD	FECHA MEDICIÓN	CONDICIÓN DE TERRENO
	(OHMIOS- METRO)				
	1	2			
1	430		430	04-abr-04	Húmedo
2	729	707	718	20-mar-04	Seco
2A	192		192	31-mar-04	Semi-húmedo
3	560	580	570	31-mar-04	Húmedo
4	30	26	28	31-mar-04	Húmedo
5	102	114	108	31-mar-04	Húmedo
6	650	636	643	20-mar-04	Seco
7	134	156	145	03-abr-04	Húmedo
8	611	625	618	03-abr-04	Húmedo
9	2574	2538	2556	03-abr-04	Húmedo
10	62	68	65	01-abr-04	Seco
11	19	25	22	01-abr-04	Semi-húmedo
12	17	13	15	01-abr-04	Semi-húmedo
13	21	25	23	01-abr-04	Seco
14	18	16	17	02-abr-04	Semi-húmedo
14A	51	65	58	02-abr-04	Semi-húmedo
15	12	26	19	02-abr-04	Seco
16	104	100	102	02-abr-04	Seco
17	83	101	92	22-abr-04	Semi-húmedo
17A	11	29	20	12-abr-04	Semi-húmedo
18		150	150	12-abr-04	Seco
18A	62	56	59	12-abr-04	Semi-húmedo
19	68	84	76	16-mar-04	Seco
20	75	77	76	12-abr-04	Semi-húmedo
21	90	102	96	16-mar-04	Seco
22	117	133	125	16-mar-04	Seco

6. CÁLCULO TEÓRICO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

En la sección 4 figura No. 10, se presenta el detalle de la puesta a tierra que reúne las especificaciones técnicas suministradas por el cliente para la construcción de la puesta a tierra de las torres de la línea de transmisión.

Bajo estos parámetros y empleando la formula de la sección 1.2.7.1.1 Figura No. 5, se realizará el calculo teórico de la resistencia de puesta a tierra de las torres, con el fin de evaluar la precisión de estas fórmulas comparando mas adelante, el valor teórico de la resistencia de puesta a tierra con el valor obtenido en los resultados de las mediciones de puesta a tierra.

Empleando los valores de resistividad obtenidos y enunciados en la Tabla No. 4, se aplicó la siguiente formula de la sección 1.2.7.1.1 Figura No. 5, para determinar los valores teóricos de resistencia de puesta a tierra.

$$R = \frac{\rho}{4\pi L} * Ln\left(\frac{2L}{a}\right) \quad [\Omega] \quad Ec. 9.$$

Donde:

ρ = Resistividad del terreno (Ω -m)

$2L$ = Longitud de la varilla (m)

a = Radio de la varilla (m)

Realizamos el cálculo tipo para la torre 1:

$$R = \frac{430}{4 * \pi * 0,9} * Ln\left(\frac{1,8}{0,008}\right) = 205,92 \quad [\Omega]$$

Este es el valor obtenido para la resistencia de puesta a tierra de una de las cuatro patas de la torre 1, para obtener el valor total de la resistencia de puesta a tierra

de la torre, consideramos que las cuatro puestas a tierra correspondientes a cada una de las cuatro patas de la torre, se encuentran en paralelo y su valor es el mismo para cada una de ellas. Así que para obtener el resultado de cuatro resistencias en paralelo de igual valor, dividimos su valor en cuatro (4):

$$R_{torre} = \frac{R}{4} = \frac{205,92}{4} = 51,48\Omega$$

De igual manera realizamos el cálculo para todas las torres de la línea de transmisión, el cual se presenta a continuación:

Tabla 5. Valores de resistencia de puesta a tierra calculados teóricamente.

TORRE	RESISTIVIDAD (Ohmios-metro)	RESISTENCIA DE LA JABALINA (Ohmios)	RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE LA TORRE (Ohmios)
1	430	205,92	51,48
2	718	343,84	85,96
2A	192	91,95	22,99
3	570	272,97	68,24
4	28	13,41	3,35
5	108	51,72	12,93
6	643	307,92	76,98
7	145	69,44	17,36
8	618	295,95	73,99
9	2556	1224,04	306,01
10	65	31,13	7,78
11	22	10,54	2,63
12	15	7,18	1,80
13	23	11,01	2,75
14	17	8,14	2,04
14A	58	27,78	6,94
15	19	9,10	2,27
16	102	48,85	12,21
17	92	44,06	11,01

TORRE	RESISTIVIDAD (Ohmios-metro)	RESISTENCIA DE LA JABALINA (Ohmios)	RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE LA TORRE (Ohmios)
17A	20	9,58	2,39
18	150	71,83	17,96
18A	59	28,25	7,06
19	76	36,40	9,10
20	76	36,40	9,10
21	96	45,97	11,49
22	125	59,86	14,97

7. MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA.

7.1 PROCEDIMIENTO DE MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA PARA TORRES

7.1.1 Objetivos. Determinación de la resistencia de puesta a tierra de las torres de la línea de transmisión El Morro – Yopal 115 kV. A través de un instrumento apropiado, utilizando el método de la caída de tensión.

7.1.2 Alcance. Este procedimiento aplica para todas y cada una de las torres de la línea de transmisión.

7.1.3 Responsable. Ing. Residente, Ing. Coordinador de HSEQ, Auxiliar de Ingeniería.

7.1.4 Materiales y Equipos a utilizar:

- Equipo de medida de Resistencia de puesta a tierra Marca HT Italia, modelo Geotest 2016.
- Varillas o “picas” metálicas de 20 cm para ser enterradas en el terreno cercano al punto de medida.
- Cables con caimanes de conexión.

7.1.5 Procedimiento. El procedimiento de medida de puesta a tierra se realiza de acuerdo a lo indicado en la norma IEC 781, y el instrumento de medida utilizado (Medidor marca HT Italia, modelo Geotest 2016) esta diseñado y fabricado para cumplir este estándar.

El procedimiento es el siguiente:

- Inserte los cuatro conectores (negro, rojo, azul y verde) de los cables de medida en los terminales correspondientes de el instrumento (E, S, H, ES).
- Entierre dos picas en dirección diagonal a la pata medida, en caso de no ser posible medir en diagonal, se debe medir en la dirección mas cercana a la diagonal, dirigiéndose hacia el eje de la línea.
- La distancia a la cual se entierra la pica más lejana corresponde aproximadamente a la diagonal de los stubs de la torre; la pica intermedia se debe enterrar aproximadamente a la mitad de la distancia entre el stub y la pica más lejana.
- Conecte los cocodrilos de acuerdo a la figura 13, es decir, cocodrilo negro y verde al stub de la pata que se esta midiendo, azul a pica mas lejana y rojo a pica intermedia.
- En caso de que la torre no haya sido montada, utilizando un cable, una los cuatro (4) stubs para dar continuidad eléctrica entre las fundaciones y así simular el efecto de la torre montada, y tener el mismo efecto sobre la medición.
- Posicione el interruptor del aparato en la posición “EARTH 3 WIRES”.
- Presione el botón GO del aparato
- Tome nota de la lectura obtenida.

- Haga variaciones de aproximadamente 1 metro en la distancia de la pica intermedia, en ambas direcciones, tanto hacia la pica lejana, como hacia el stub y repita la medida.
- Descarte las mediciones que varíen significativamente con respecto a la media y consigne en el formato las medidas más cercanas, calcule el promedio.
- Repita todo el procedimiento anterior en otra pata de la torre, de preferencia en la opuesta a la medida.
- Consigne en el formato las condiciones de humedad superficial del terreno de medida.
- Este procedimiento se debe realizar en 2 o más patas de la torre.

7.1.6 Duración. Sesenta (60) minutos aproximadamente en todo el proceso de medición por torre.

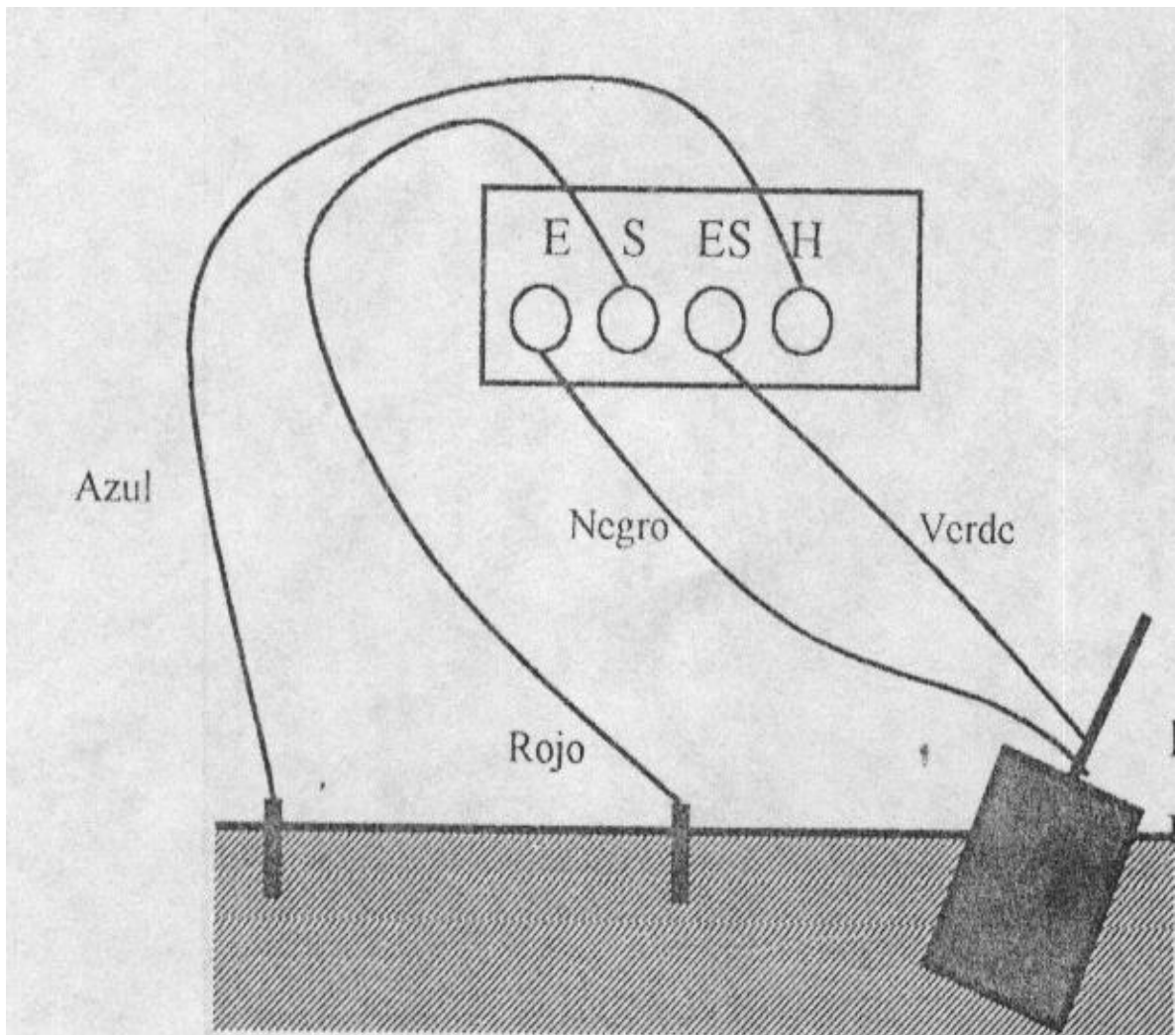
7.1.7 Condiciones especiales en salud, seguridad, ambiental y calidad del proyecto:

- Personal con experiencia y criterio a cargo de la ejecución de la actividad.
- Inspección preliminar de los equipos a utilizar.

7.1.8 Documentos:

- Manual de operación del equipo de medida
- Certificado de calibración del equipo de medida.

Figura 13. Ubicación de cables de medida.



7.1.9 Registro. Formato para el registro de mediciones de puesta a tierra (1 por torre y medición en un mismo día)

7.2 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DE PUESTA A TIERRA.

En el siguiente cuadro presentamos los resultados obtenidos:

Tabla 6. Valores de resistencia de puesta a tierra de las torres.

TORRE	MEDICIONES POR PATA (OHMIOS)				PROMEDIO TORRE	FECHA MEDICIÓN	CONDICIÓN DE TERRENO
	A	B	C	D			
1		42,07		51,03	46,55	04-abr-04	Húmedo
2	45			114.1	79,55	20-mar-04	Seco
2A		24,8		23,9	24,35	31-mar-04	Semi-húmedo
3	81,2		60,5		70,85	31-mar-04	Húmedo
4		3,57	3,38		3,48	31-mar-04	Húmedo
5		18,61		9,01	13,81	31-mar-04	Húmedo
6		73,95		67,85	70,90	20-mar-04	Seco
7			18,15	19,01	18,58	03-abr-04	Húmedo
8	50,95		85,9		68,43	03-abr-04	Húmedo
9			302	407	354,50	03-abr-04	Húmedo
10	7,83		9,0		8,415	01-abr-04	Seco
11		2,89		2,77	2,83	01-abr-04	Semi-húmedo
12		1,9		1,85	1,875	01-abr-04	Semi-húmedo
13		2,49	3,40		2,945	01-abr-04	Seco
14			2,15	2,08	2,115	02-abr-04	Semi-húmedo
14A		8,09		6,90	7,50	02-abr-04	Semi-húmedo
15	2,33			2,51	2,42	02-abr-04	Seco
16	13,08	13,15			13,12	02-abr-04	Seco
17	11,80			11,70	11,75	22-abr-04	Semi-húmedo
17A		2,37		2,62	2,50	12-abr-04	Semi-húmedo
18	19,56		18,84		19,20	12-abr-04	Seco
18A		7,54		7,55	7,55	12-abr-04	Semi-húmedo
19	5,36	12,73	9,44	11,56	9,77	16-mar-04	Seco
20	8,68		10,85		9,77	12-abr-04	Semi-húmedo
21		13,51	11,25		12,38	16-mar-04	Seco
22	16,48	15,65			16,07	16-mar-04	Seco

Como se puede observar en los resultados obtenidos existen 7 torres de la línea de transmisión, cuyo valor de resistencia de puesta a tierra no cumple con la medida requerida ($< 20 \Omega$).

7.3 COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA CALCULADOS TEORICAMENTE CONTRA LOS VALORES OBTENIDOS A TRAVES DE LA MEDICIÓN

En la siguiente tabla presentamos los valores calculados teóricamente, junto con los valores obtenidos a través de la medición y el cálculo del error porcentual.

Tabla 7. Comparación de los valores teóricos de resistencia de puesta a tierra contra los valores medidos.

TORRE	RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA TEORICA (Ohmios)	RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA MEDIDA (Ohmios)	ERROR PORCENTUAL
1	51,48	46,55	10,59%
2	85,96	79,55	8,06%
2A	22,99	24,35	5,60%
3	68,24	70,85	3,68%
4	3,35	3,48	3,53%
5	12,93	13,81	6,37%
6	76,98	70,90	8,58%
7	17,36	18,58	6,57%
8	73,99	68,43	8,13%
9	306,01	354,50	13,68%
10	7,78	8,415	7,52%
11	2,63	2,83	6,93%
12	1,80	1,875	4,22%
13	2,75	2,945	6,50%
14	2,04	2,115	3,77%
14A	6,94	7,50	7,35%
15	2,27	2,42	6,00%
16	12,21	13,12	6,89%
17	11,01	11,75	6,26%
17A	2,39	2,50	4,03%
18	17,96	19,20	6,47%
18A	7,06	7,55	6,38%
19	9,10	9,77	6,89%
20	9,10	9,77	6,82%
21	11,49	12,38	7,16%
22	14,97	16,07	6,85%

De lo anterior se puede ver que es muy importante conocer el valor de resistividad del suelo en el cual se desea construir una puesta a tierra, ya que se pueden aplicar fórmulas desarrolladas teóricamente, para obtener antes de construir la puesta a tierra, un valor de resistencia que dentro de un margen aceptable de error, permita tomar decisiones coherentes en el momento de su construcción.

8. ALTERNATIVAS PARA REDUCIR LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

Cuando la resistividad del terreno es muy elevada, y en donde las jabalinas no pueden enterrarse profundamente debido a rocas se utilizan diversos métodos para mejorar las condiciones. En general todos los métodos tratan de crear una mejor conductividad en las primeras capas o cilindros de tierra que rodean al electrodo, en donde la superficie conductora es pequeña.

Los métodos que analizaremos, como alternativa para la reducción de la resistencia de puesta a tierra en aquellas torres, cuyo valor excede al requerido, son los siguientes:

- Electrodo profundos
- Electrodo múltiples en paralelo.
- Contrapesos.
- Reducción de la resistividad del suelo mediante procedimientos artificiales.

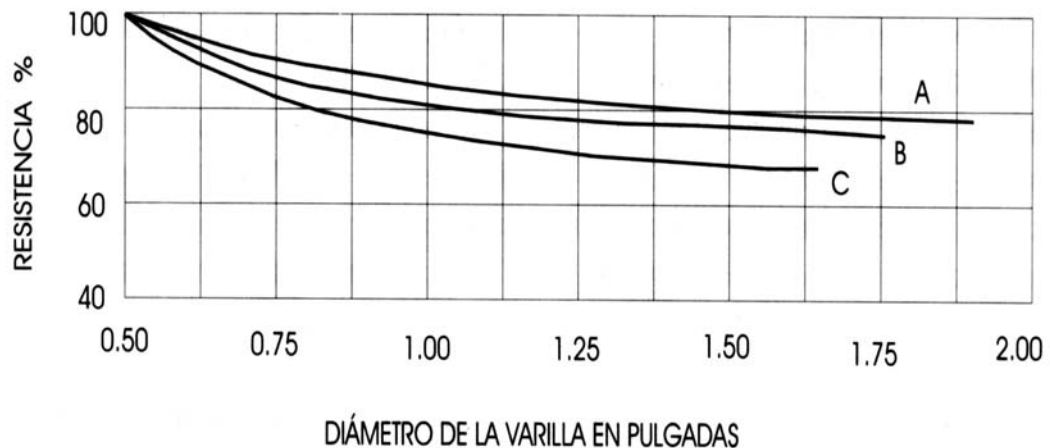
8.1 MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EMPLEANDO ELECTRODOS PROFUNDOS O ELECTRODOS MÚLTIPLES EN PARALELO

En la práctica, cuando la resistencia del electrodo único mencionado, excede del valor buscado, esa resistencia se puede reducir de las siguientes maneras:

1. Usando varillas de mayor diámetro.
2. Usando varillas más largas
3. Poniendo dos, tres o más varillas en paralelo.

8.1.1 Varillas de mayor diámetro. Usando varillas de 19 mm en lugar de varillas de 13 mm se logra una reducción en la resistencia a tierra de hasta un 10% máximo (véase figura 15).

Figura 14. Relación de resistencia con varillas de mayor diámetro

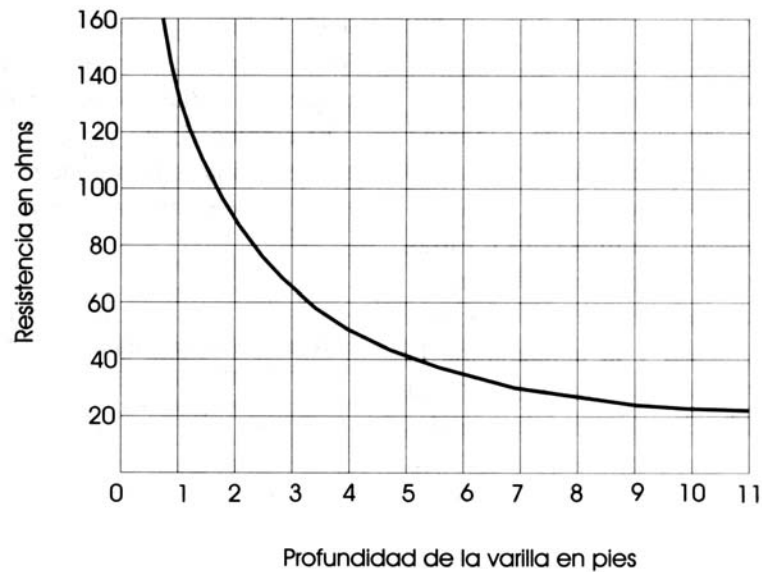


La figura 14 muestra tres curvas, la curva **A** del Nacional Bureau of Standards, la curva **B** de los laboratorios UL de Chicago y la curva **C** de Pittsburg.

8.1.2 Varillas mas largas. En los casos donde las capas superiores de la tierra son de arena y donde a gran profundidad se encuentra una capa de terreno húmedo, existen varillas que se acoplan unas a otras para lograr longitudes hasta de 15 m.

Aunque en algunas subestaciones de compañías eléctricas de los E. U. han empleado varillas con longitudes de hasta 30 m. Por lo general, doblando el largo, se obtiene una reducción del 40% de resistencia a tierra (véase figura 15).

Figura 15. Relación de resistividad con varillas más largas.



8.1.3 Varillas en paralelo. Al colocar varias varillas en paralelo se disminuye considerablemente la resistencia. Las varillas de tierra no deben ser colocadas muy cerca una de otra, porque cada varilla afecta directamente el potencial de las otras varillas. La distancia entre ellas no debe ser menor a la longitud del electrodo.

La ecuación para calcular la resistencia a tierra de un electrodo tipo varilla es la siguiente:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \left(4 \frac{L}{r} \right) - 1 \right) \quad [\Omega] \quad \text{Ec. 10.}$$

La ecuación para calcular la resistencia a tierra de dos electrodos tipo varilla es la siguiente:

$$\text{Para } d > L \quad R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \left(4 \frac{L}{r} \right) - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi d} \left(1 - \frac{L^2}{3d^2} + \frac{2L^4}{5d^4} \right) \quad [\Omega] \quad \text{Ec. 11}$$

$$\text{Para } d < L \quad R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln\left(4\frac{L}{r}\right) + \ln\left(4\frac{L}{d}\right) - 2 + \frac{d}{2L} - \frac{d^2}{16L^2} + \frac{d^4}{512L^4} \right) [\Omega] \text{ Ec. 12}$$

La ecuación para calcular la resistencia a tierra de **n** electrodos tipo varilla es la siguiente:

$$R = \frac{\rho}{n} \left(0,404 + \frac{0,16}{d} \ln(0,655n) \right) [\Omega] \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

ρ = resistividad en Ω -m

L = longitud del electrodo en metros

r = radio de el electrodo en metros

d = distancia de separación de los electrodos metros.

Estos valores son válidos cuando la corriente a tierra es de naturaleza estacionaria (c. d) o casi estacionaria (50-60 Hz).

La resistencia a tierra de una varilla de longitud 1,8 m, en un suelo con resistividad 100 Ω -m y radio 0,008 m, es de 51,30 Ω . La resistencia a tierra de dos varillas en paralelo separadas a una distancia de 1,8 m disminuye a 30,37 Ω . El valor de la resistencia a tierra disminuye al 59%.

8.2 REDUCCIÓN DE LA RESISTIVIDAD MEDIANTE PROCEDIMIENTOS ARTIFICIALES

El problema de lograr una resistencia baja en la roca así como en otros suelos de alta resistividad, está asociada con el material en contacto con el electrodo y la compactación que éste recibe al rellenar el agujero.

El relleno ideal debe compactarse fácilmente, debe ser no corrosivo y a la vez buen conductor eléctrico. Existen tratamientos químicos que son una buena solución para suelos altamente resistivos, estos se deben acompañar de un efectivo y regular programa de mantenimiento.

Entre otros compuestos químicos patentados tenemos el Hidrosolta, Favigel, Electropat, y existen muchos más que cumplen con esos requisitos en diferentes países con diferentes nombres comerciales. A continuación veremos los tres compuestos nombrados anteriormente.

8.2.1 Hidrosolta. Básicamente, la Hidrosolta es una mezcla de óxidos de metales tensoactivados con las siguientes especificaciones:

- Resistividad máxima 30 ohmios – cm.
- Calor específico: 100 W Sg/gr (70°C)
- Capacidad Específica-permitividad relativa: 10.000.000
- Peso específico: 1,3 g/ cm³
- PH hidratada con 35 % de agua: 9.9 (alta basicidad, por lo cual no hay corrosión)- (ácido ≤ 7).
- Color verdoso húmedo

La hidrosolta emplea la técnica de dominio por almacenamiento de energía, la cual fue diseñada para ser efectiva independientemente del suelo natural, ya que este solo sirve de referencia para el condensador.

8.2.1.1 Comparación entre el sistema de puesta a tierra con pozo de hidrosolta y el sistema de puesta a tierra tradicional

TRADICIONAL

OBJETIVO:

- Control de sobretensiones.
- Conversión de energía en calor por medio del suelo natural.
- Disminución del valor de resistencia estacionaria utilizando el concepto de interconexión de tierras, lo cual conlleva a la utilización de una gran cantidad de cobre enterrado siendo imposible en algunos terrenos de alta resistividad comunes en nuestro medio. También hace partícipe a equipos de estado sólido de las sobretensiones de la red.
- Dar referencia al sistema eléctrico

OPERACIÓN

Tensiones de paso y toque:

Se presentan este tipo de tensiones debido al cambio de velocidad de la energía al pasar de las varillas al suelo natural. Por esta razón los equipos de estado sólido instalados en una subestación de media y alta tensión deben soportar sobretensiones presentes a menudo.

CON HIDROSOLTA

OBJETIVO:

- Almacenar la energía de las descargas atmosféricas (97% almacenada y 3% convertida en calor)
- Cambio en el factor de potencia en condiciones de falla a tierra del SPAT (hasta $F. P.=0,2$ capacitivo), evitando alta energía activa que caliente el suelo natural.
- Se establece el criterio de selectividad de tierras (pararrayos, equipos de estado sólido, y sistemas de potencia) debido a la independencia creada por la técnica de almacenamiento de energía
- Dar balance a las corrientes en desequilibrio lo cual ofrece una magnanimidad en la referencia del sistema eléctrico.

OPERACIÓN

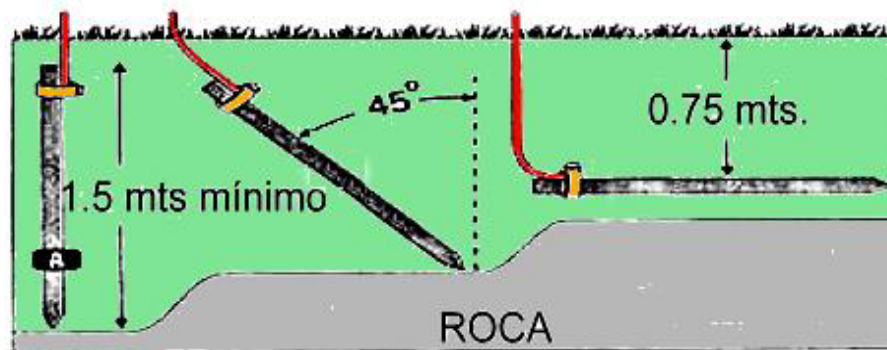
Tensiones de paso/ toque:

Se mantiene la mínima tensión de paso/ toque por lo tanto la protección humana, de estado sólido y de equipos eléctricos es óptima.

8.2.1.2 Instalación. Luego de obtener las recomendaciones dadas por el análisis de la resistividad, se procede a realizar la excavación del pozo de la puesta a tierra. Esta excavación puede ser vertical, horizontal o en un ángulo de 45° (véase figura 16).

Las recomendaciones que se harán son basadas en las medidas de resistividad del terreno, las especificaciones técnicas de la Hidrosolta y la experiencia adquirida en las observaciones realizadas en las puestas a tierra hechas durante la práctica.

Figura 16. Formas de instalación de los electrodos.



En pozo vertical de 15 kilogramos de Hidrosolta.

Paso 1. Haga un pozo de 1,80 m de profundidad con 30 cm de diámetro.

Paso 2. Disolver 3 kg de Hidrosolta en un balde con 5 litros de agua, con esta mezcla remojar las paredes del pozo, el resto de la Hidrosolta (12 kg) en 5 litros de agua y llenar el pozo con la mezcla.

Paso 3. Colocar una varilla Cooperweld de 1,80 m y diámetro 5/8", si la resistividad del terreno es menor de 100 Ω-m. Si la resistividad está entre 100 y 250 Ω-m se recomienda utilizar una varilla no menor a 2,40 m.

Con una varilla de longitud 1,80 m, radio 0,008 m y una resistividad del terreno de 100 Ω-m, se obtiene una resistencia a tierra dada por *Ec. 10*:

$$R = \frac{100[\Omega - m]}{2\pi * 1,80[m]} \left(\ln \left(4 \frac{1,80[m]}{0,008[m]} \right) - 1 \right) = 51,30[\Omega]$$

Aumentando la longitud de la varilla a 2,40 m se obtiene una resistencia de:

$$R = \frac{100[\Omega - m]}{2\pi * 2,40[m]} \left(\ln \left(4 \frac{2,40[m]}{0,008[m]} \right) - 1 \right) = 40,39[\Omega]$$

Se obtiene una disminución de la resistencia de a tierra del 21%.

Para resistividades del terreno mayores de 250 Ω-m en puestas a tierra, se realizarán los siguientes pasos:

- Utilizar una mayor densidad en la mezcla de Hidrosolta y agua (3 litros de agua por 15 kg de Hidrosolta, mezclando fuertemente) y utilizar como mínimo 45 kilogramos de Hidrosolta.
- Aumentar la longitud de varillas Cooperweld.

Paso 4. Con el material de relleno escogido (recomendándose terrenos orgánicos y húmedos), rellenar con una prima capa sin aprisionar.

Paso 5. Rellenar el resto del pozo compactando cuidadosamente, para evitar la degradación por oxidación el electrodo debe quedar cubierto (no quedar en contacto con el aire).

En pozo horizontal de 90 kilogramos de Hidrosolta. En terrenos con una capa de roca ubicada a menos de 1,80 metros de profundidad.

Paso 1. Haga un una zanja de 30 cm de ancho, 60 cm de profundidad y de longitud 1,0 metros.

Paso 2. Disolver cada 45 kg de Hidrosolta en 9 litros de agua y llenar el pozo con la mezcla hasta aproximadamente 3 cm de altura.

Paso 3. Colocar una lámina de cobre de 0,004 m de espesor por 7 de ancho y 1,0 m de longitud, si la resistividad del terreno es menor de 100 Ω -m.

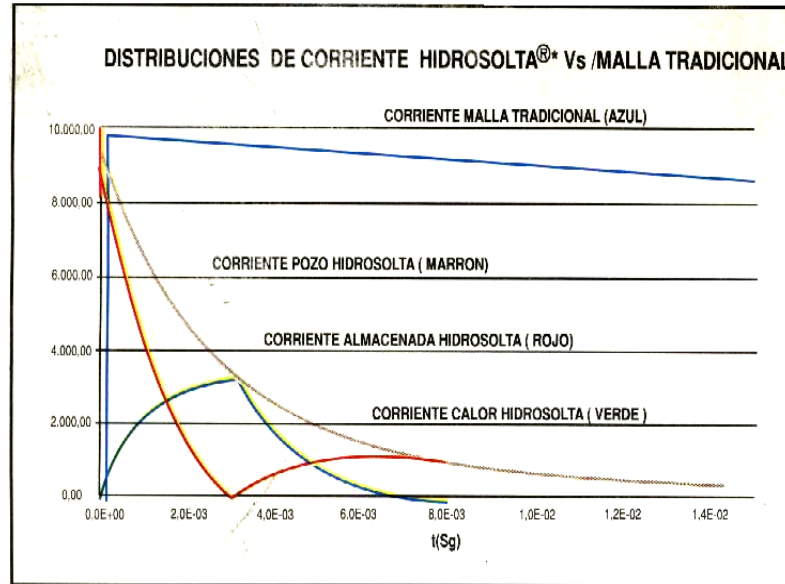
Si la resistividad está entre 100 y 250 Ω -m se recomienda utilizar una varilla no menor 2,0 m.

Paso 4. Esparcir otra capa de Hidrosolta (45 kg en 9 litros de agua) sobre la zanja aproximadamente cubriendo completamente el electrodo, dejando libre el espacio necesario para conexión exotérmica.

Paso 5. Con el material de relleno escogido (recomendándose terrenos orgánicos y húmedos), rellenar con una prima capa sin aprisionar.

Paso 6. Rellenar el resto del pozo compactando cuidadosamente.

Figura 17. Comparación del comportamiento ante descargas atmosféricas de 10 kA (Malla tradicional Vs. Pozo de Hidrosolta)



8.2.2 ElectroPAT. ElectroPAT® Es una solución de puesta a tierra (PAT) de larga vida, compuesta por tierras arcillosas y material tenso-activo, los cuales en presencia de productos alcalino-térreos y de transición producen un mejorador de tierra, con un alto poder de absorción y retención de agua, un volumen de dispersión eficiente y óptima intimación con el terreno.

Figura 18. Diagrama general de instalación del ElectroPAT.



Presenta las siguientes características:

- No se Agrieta, ni se Desmorona al perder Humedad, sino que se compacta alrededor del electrodo.
- Su Resistividad es del orden de 25 Ω -cm.
- Para el caso de electrodos verticales, se obtiene la disminución de la resistencia del terreno natural, mínimo a una tercera parte de su valor original, en estado seco.
- Producto de gran estabilidad tanto en su estructura molecular como fibrilar y sus propiedades eléctricas, aún en condiciones críticas de sequía o de intensas precipitaciones lluviosas.

8.2.2.1 Consideraciones en la Instalación de un electrodo vertical. En el caso de aplicaciones en las que eventualmente la puesta a tierra va a estar sometida a grandes corrientes, producto de fallas o como consecuencia inherente del papel a desempeñar, como en las PATs (puestas a tierra) de pararrayos, el diseño tiene como objetivo suministrar una mayor longitud de contacto entre el electrodo y el producto “A” de **ElectroPAT®**, de bajísima resistividad, permitiendo al pozo una capacidad de disipación de corriente según la expresión:

$$I = \frac{2,488}{\sqrt{t}} \quad \text{Ec. 14}$$

En esta expresión se ha tenido en cuenta que $L = 2,00$ m, t es el tiempo de duración de la falla en segundos, I es la corriente de falla en amperios (A).

Por ejemplo, en el caso de un rayo la capacidad de disipación de corriente es de 393 kA, muy superior a las típicas, mientras que una falla en un transformador al

azar, con un tiempo de reacción de la protección de 5 ciclos es del orden de 8,0 kA.

En el diseño de la PAT debe ser tomada en cuenta la capacidad del pozo, implementando tantos pozos de un diámetro óptimo, como se requiera, de acuerdo con la corriente de falla o de descarga máxima esperada.

En Instalaciones industriales, la aplicación del producto **ElectroPAT®** es posible, con electrodo hidráulico o con electrodo de alma llena (varilla), de 2,40 metros de longitud ó menor si las condiciones del terreno lo exigen.

En la figura 19 se presenta un corte vertical de un polo a tierra, en una instalación industrial, con un electrodo de 1,80 metros, **con la salvedad** que esta geometría cambia de acuerdo con el tipo de terreno donde se requiera efectuar la puesta a tierra, ya que el diámetro de la médula es función de la resistencia deseada.

Para este ejemplo, el tubo de concreto, cuya única función es hacer de formaleta, puede ser sustituido por una lámina de acero-carbón, configurado en cilindros de $\phi 6"$ y $4"$ de calibre 10 ó mayor y perforada a lo largo de su perímetro ó en zaranda diagonal de $8 \times 8 \times 0,9$, con revestimiento en pintura electrostática, para encontrar permanentemente transferencia de humedad y equilibrio electroquímico, entre la médula de **ElectroPAT®** y el terreno natural.

8.2.2.2 Procedimiento de Aplicación Industrial de “ElectroPAT®”. El procedimiento para la aplicación de “**ElectroPAT®**” de cada electrodo vertical, en instalaciones medianas y grandes, es el siguiente:

Paso 1. Se excava por cada electrodo a instalar un hueco de 50 cm de diámetro (para este ejemplo) y una profundidad de 2,5 metros, si la varilla es de 2,40 m (de

1,90 m, si la varilla es de 1,80 m). No tiene en cuenta la profundidad adicional para la construcción de la caja (opcional).

Paso 2. Se instala en el fondo del foso abierto un tubo de concreto ó lámina ó zaranda de 6" de diámetro y se llena su interior con veinticinco (25) kg de nuestro producto **ElectroPAT®**, tipo "A".

Paso 3. Posteriormente, se instala encima un tubo de concreto ó lámina ó zaranda de 4" y se procede a rellenarlo con quince (15) kg de nuestro producto **ElectroPAT®**, tipo "A".

Paso 4. Finalizada esta operación se instala el electrodo, teniendo en cuenta que quede a una altura mínima de 10 cm del fondo del tubo de concreto de 6" procurando que quede centrado.

*Para llenar la totalidad de espacio interior de los tubos de concreto se requieren 40 kg de producto **ElectroPAT®**, Tipo A.*

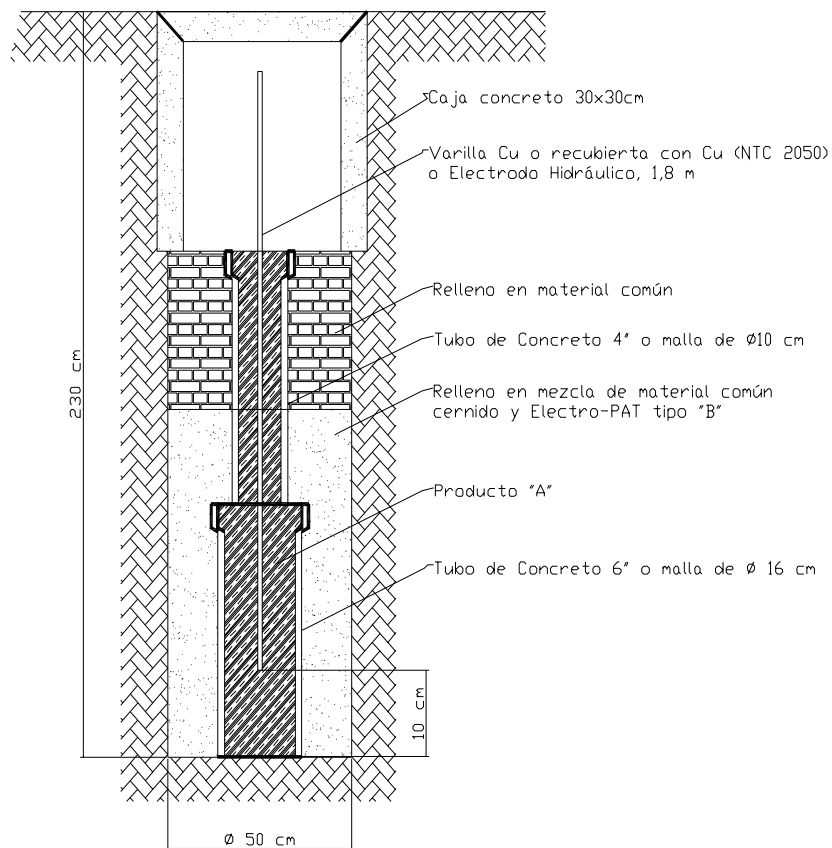
Paso 5. Los dieciséis (16) kg de producto **ElectroPAT®**, tipo "B" se mezclan dieciséis (16) baldados del terreno que se retiró de la hechura del foso, que se ha hecho pasar por un tamiz N° 4, si es posible, con arcilla ó capa vegetal, igualmente tamizado, procurando obtener la máxima homogeneidad posible. Con esta mezcla se rellena el espacio que queda alrededor de los tubos de concreto (las carcasas de acero-carbón ó aluminio ó las zarandas) de 6" y 4" de diámetro, apisonando bien cada seis (6) paladas, las que se van depositando equitativamente en los cuatro lados del hueco, agregando en cada ocasión,

después de apisonar, abundante agua, dependiendo del grado de humedad del terreno natural.

Paso 6. Una vez se agota la mezcla, se sigue rellenando el hueco con el material sobrante.

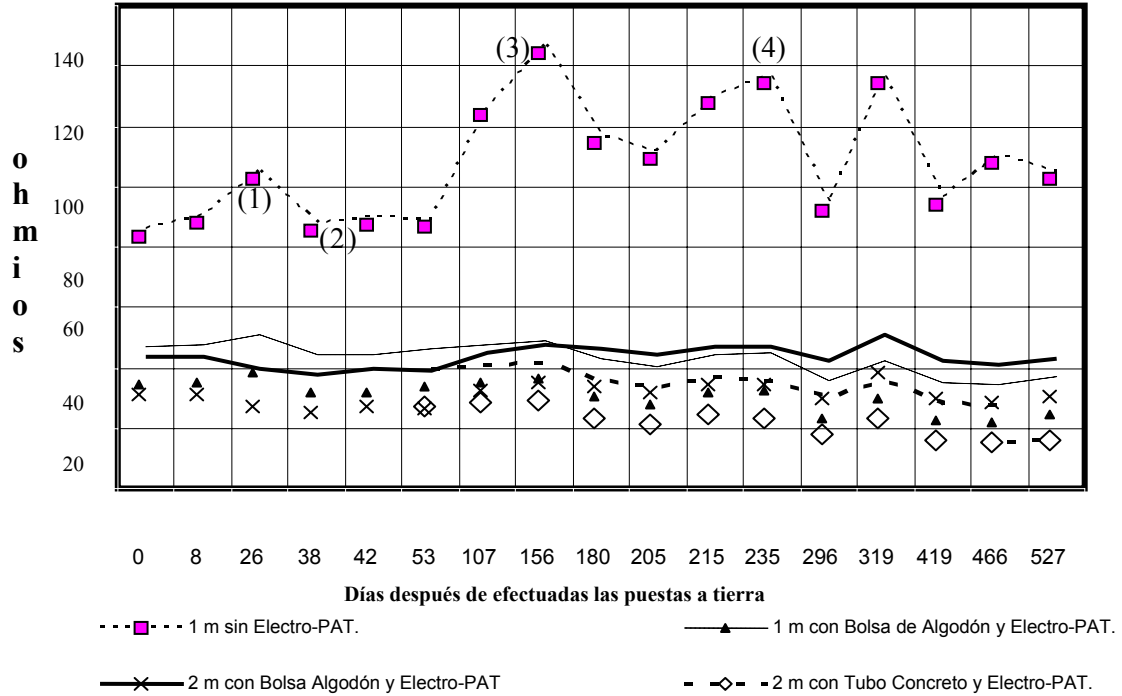
Paso 7. Instalar una caja de inspección (opcional), en la parte superior, como la que se muestra en la figura 19.

Figura 19. Corte Vertical de una puesta a tierra para instalaciones industriales.



8.2.2.3 Comportamiento de una puesta a tierra con ElectroPAT

Figura 20. Grafico del comportamiento de la resistencia de puesta a tierra con Electro – PAT.



De los resultados presentados en el gráfico, vamos a analizar tres situaciones:

- Corresponde a las lecturas de resistencia 26 días después de efectuadas las puestas a tierra y época de días calurosos. En dicho punto se encuentra que la resistencia de la puesta a tierra, sin tratamiento con **ElectroPAT®** es de 105 ohmios, la cual se reduce a 50 ohmios en la puesta a tierra utilizando **ElectroPAT®**, con electrodo de (1) metro (Reducción de la Resistencia: 52%). En la puesta a tierra con el electrodo a 2 metros de profundidad, con formaleta de bolsa de algodón ó tubo de concreto, dentro de la médula de **ElectroPAT®**, tipo “A”, la resistencia se reduce a 40 ohmios (Reducción de la Resistencia: 62%).

- **PUNTO (2):** Pertenece a las lecturas de resistencia 42 días después de efectuadas las puestas a tierra y época de días lluviosos. En dicho punto se encuentra que la resistencia de la puesta a tierra, sin tratamiento con **ElectroPAT®** es de 87 ohmios, la cual se reduce a 46 ohmios en la puesta a tierra utilizando **ElectroPAT®**, con electrodo a un (1) metro (Reducción de la Resistencia: 47%). En la puesta a tierra con el electrodo a 2 metros de profundidad, con formaleta de bolsa de algodón ó tubo de concreto, dentro de la médula de **ElectroPAT®**, tipo “A”, la resistencia se reduce a 39 ohmios (Reducción de la Resistencia: 55%).
- **PUNTO (3) y PUNTO (4):** Conciernen a las lecturas de resistencia 156 y 235 días después de efectuadas las puestas a tierra y época de verano. En dichos puntos se encuentra que la resistencia de la puesta a tierra, sin tratamiento con **ElectroPAT®** es de 148 y 137 ohmios, las cuales se reducen a 48 y 45 ohmios en la puesta a tierra utilizando **ElectroPAT®**, con electrodo a un (1) metro (Reducción de la Resistencia: 68%).

En la puesta a tierra con el electrodo a 2 metros de profundidad, dentro de la médula de **ElectroPAT®**, tipo “A”, con formaleta de bolsa de algodón la resistencia se reduce a 48 y 47 ohmios (Reducción de la Resistencia: 68%) y en tubo de concreto a 41 y 35,5 ohmios. (Reducción de la Resistencia: 73%).

A los 296 días, después del intenso verano que ha tenido todo el país, se puede observar en la lectura tomada que nuevamente la resistencia del pozo sin tratamiento con **ElectroPAT®** reduce a 94,5 ohmios, mientras los pozos con tratamiento con **ElectroPAT®** mantienen los valores con cierta baja, dentro de su rango de una reducción de resistencia entre 68% y 73%.

Vale la pena resaltar como la humedad en época de invierno, aún en un terreno sin tratamiento, disminuye su resistencia [Caso del Punto (2)] y como los pozos con tratamiento con **ElectroPAT®** se mantienen, aún en épocas de intenso verano en valores de resistencia de 41 a 48 ohmios.

8.2.3 Favigel. Favigel® es un suelo artificial compuesto, que permite un tratamiento físico-químico al terreno circundante al electrodo, que le garantiza un aumento considerable a su conductividad.

Presenta las siguientes características:

- Alta temperatura de fusión: Debido a las altas temperaturas presentes en el caso de una falla, muchos suelos naturales se cristalizan a 200 o 300°C. Favigel® presenta una temperatura de fusión mayor de 1000°C que le permite soportar fallas severas.
- Baja resistividad: Una vez humedecido mantiene su resistividad inferior a 0,5 Ω -m lo que se traduce en mejoras de la resistencia de puesta a tierra superiores al 90%. Para fallas de baja frecuencia, se comporta como resistivo y para alta frecuencia es un circuito R C.
- Estabilidad: Por desarrollar un mínimo de procesos químicos, presenta una gran estabilidad independiente del tiempo.
- Tixotropía: Gracias a su forma de retención de humedad, Favigel® puede pasar del estado coloidal al estado líquido y viceversa.
- Retención de humedad: Por su capacidad de absorción de agua es un excelente material higroscópico.

- Anticorrosivo: Su pH de 8,8 garantiza mínima corrosión en los electrodos.
- Expansión: Su gran capacidad de retención de humedad lo hace tomarla aun del medio circundante, originando una presión interna que produce ramificaciones y amplían el área efectiva de los electrodos, sin que emigre como en el caso de las sales.
- Amortiguador: Con el fin de soportar el esfuerzo mecánico de la onda de choque, se diseñó con un componente que cumpla esta función.

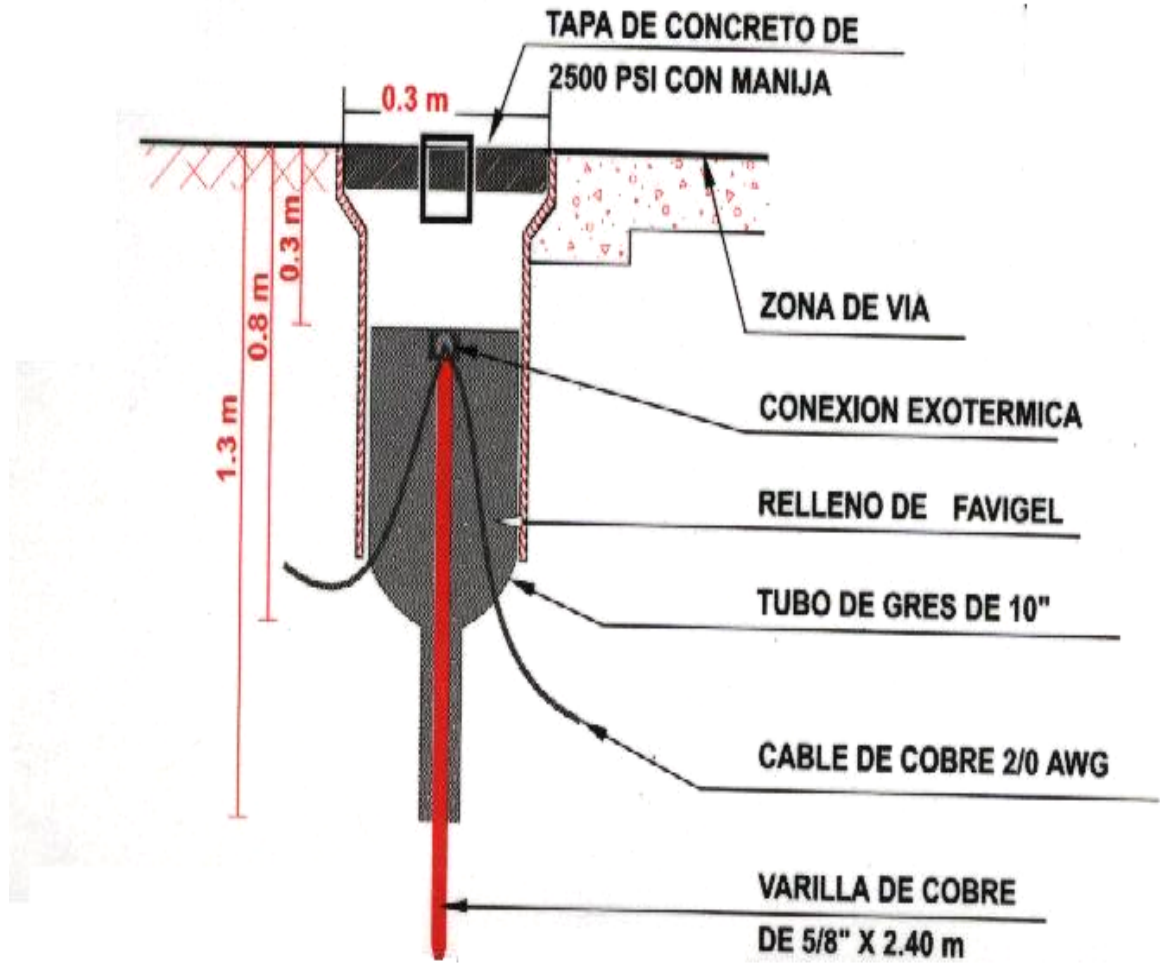
8.2.3.1 Procedimiento de aplicación:

El procedimiento normal debe incluir:

- Medir resistividades.
- Hacer excavaciones.
- Enterrar electrodos.
- Aplicar favigel
- Hidratar.
- Medir resistencia obtenida.

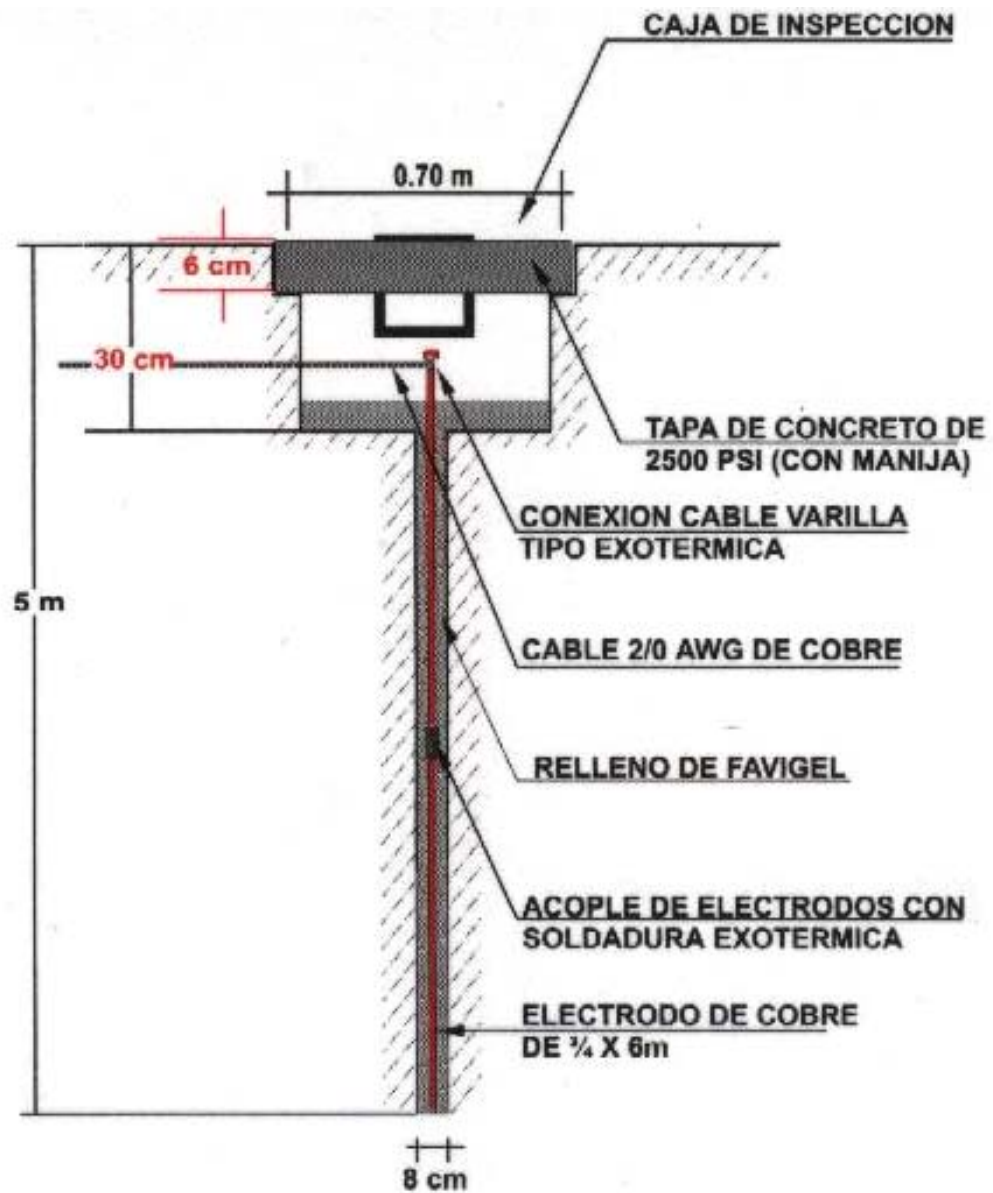
Para suelos blandos se recomienda aplicarlo como se indica en la figura 21. La aplicación mínima de favigel es de una dosis por cada electrodo o por cada 7 metros de cable enterrado.

Figura 21. Aplicación en suelos blandos de favigel.



Para suelos arenosos, se recomienda aplicarlo con electrodos verticales seleccionados, como se indica en la figura 22.

Figura 22. Aplicación en suelos arenosos de favigel.

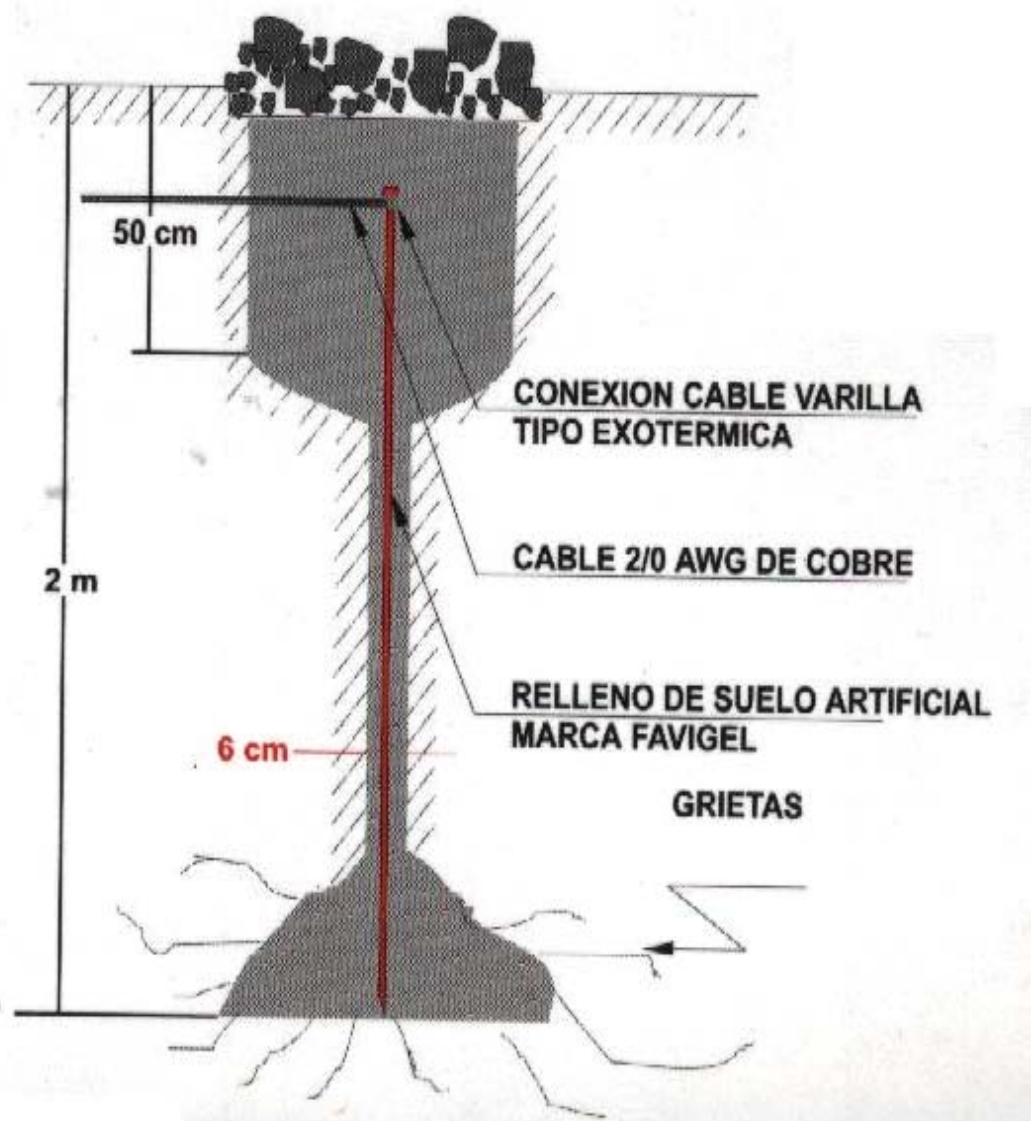


Para suelos rocosos se recomienda lograr la resistencia exigida, en tres etapas: En la primera con electrodos convencionales, si no se logra reducir, instalando contrapesos.

En una tercera etapa, conectando los contrapesos en forma de anillos concéntricos cerrando una malla.

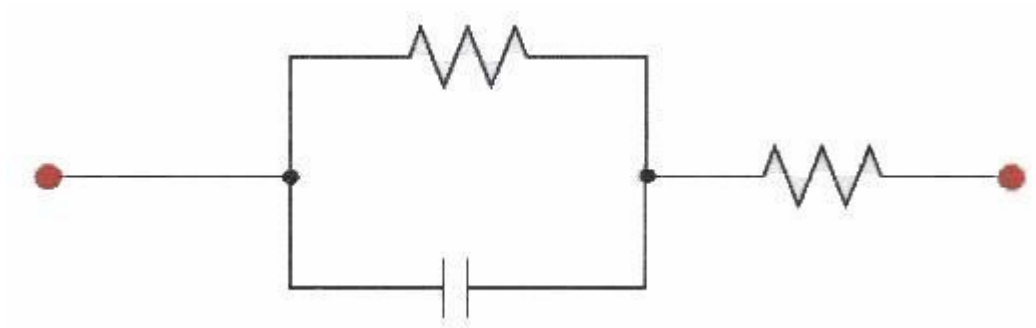
Para suelos rocosos duros, se deben producir artificialmente, como se muestra en la figura 23.

Figura 23. Aplicación en suelos rocosos de favigel.



8.2.3.2 Circuito equivalente:

Figura 24. Circuito equivalente de favigel.



8.2.3.3 Como se realiza la hidratación. En todos los casos Favigel se aplica en su estado seco. La hidratación natural puede ser natural o manual y siempre se hará cuando se haya vertido en la excavación. Este producto no requiere hidratación previa por agitación. Si se desean obtener resultados inmediatos, bien por que se disponga de agua o por carecer de una fuente de hidratación natural, debe agregarse aproximadamente 5 galones de agua por cada dosis utilizada. En sitios a la intemperie, o de difícil acceso como torres de líneas de transmisión o de comunicaciones, no exige transporte de agua hasta el sitio, puesto que se hidratará con el agua lluvia.

Figura 25. Reducción de la Resistencia de Puesta a tierra con Favigel.



8.3 CONTRAPESOS

El sistema para construir puestas a tierra mal denominado CONTRAPESOS (por su nombre en ingles counterpoise), también llamado de DISPERSORES, de COMPENSACION, de CONTRAANTENA o RADIALES, consiste en enterrar conductores solos o con un electrodo en su extremo, donde la profundidad de enterramiento (del orden de 40 cm) no afecta mucho.

En un contrapeso, los impulsos se propagan a 1/3 de la velocidad de la luz o sea 80 m / μ s. Un cable contrapeso tiene una impedancia inicial de impulso alta (100 a 200 Ω).

Al propagarse la onda de corriente a través del contrapeso, esta impedancia es reducida hasta su resistencia de dispersión en un tiempo que depende de la longitud del cable y de la velocidad de propagación del impulso.

Calcular contrapesos con $t \geq 1 \mu$ s garantiza que cuando la onda vuelve, el fenómeno esta decreciendo.

Según algunos estudios, los contrapesos recogen entre el 40% y el 80% de la corriente de falla y las puestas a tierra de las torres recogen entre el 20% y el 60% de ella.

Para calcular la longitud de un contrapeso en metros, se recomienda la siguiente ecuación:

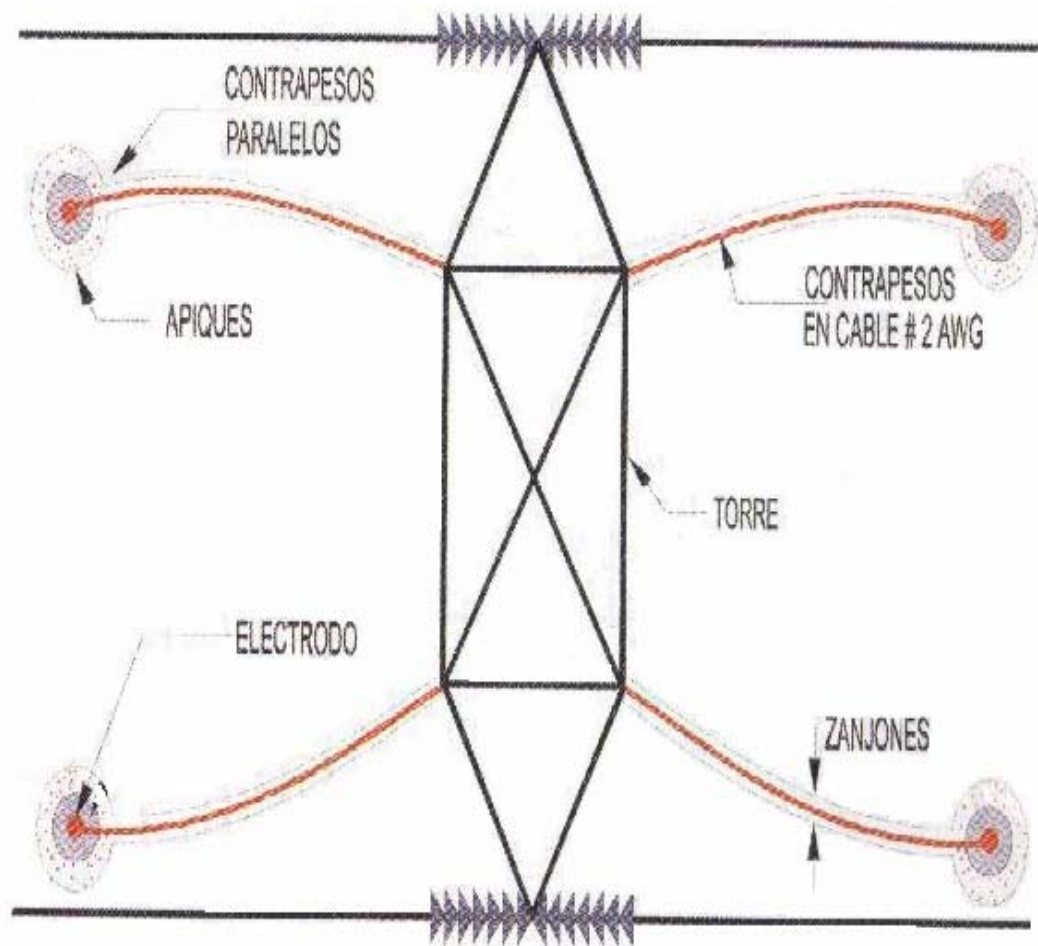
$$L_c = 50 - \frac{2}{3}(H - 15) \text{ [m]} \quad \text{Ec. 15.}$$

Donde L_c es la longitud del contrapeso en metros y H es la altura de la torre.

En la práctica deben colocarse contrapesos entre 15 y 20 metros. Es mejor utilizar varios contrapesos cortos, que uno largo por su respuesta transitoria.

La inductancia típica de una interconexión con contrapeso es de $1 \mu\text{H} / \text{m}$.

Figura 26. Contrapesos en las líneas de transmisión.



8.3.1 Alternativas de instalación de los contrapesos. A continuación se presentan varias alternativas existentes para la instalación de contrapesos:

Figura 27. Alternativa A de Instalación de contrapesos.

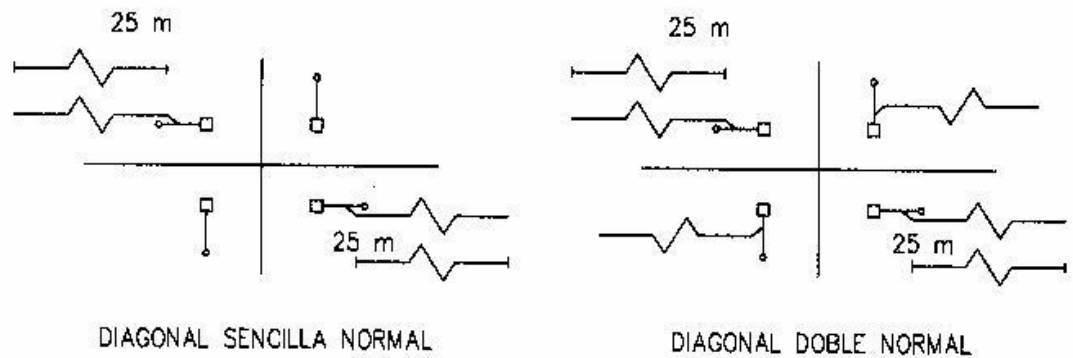


Figura 28. Alternativa B de Instalación de contrapesos.

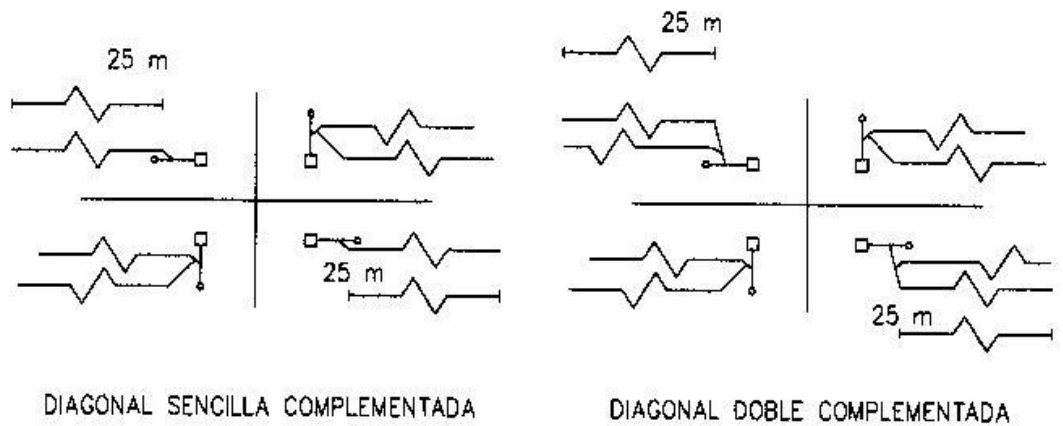
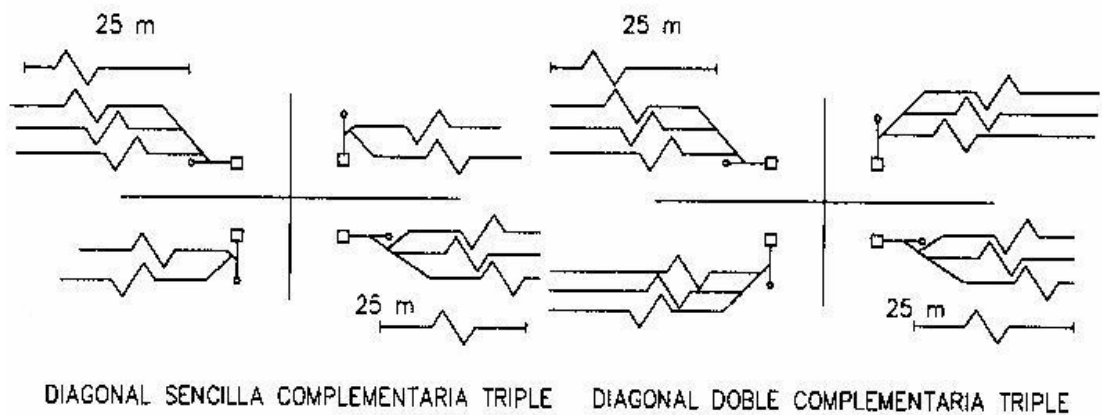


Figura 29. Alternativa C de Instalación de contrapesos.



9. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS PRESENTADAS PARA LA REDUCCIÓN DEL VALOR DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

Después de haber presentado las características técnicas de las diferentes alternativas que se encuentran en el mercado, para la reducción del valor de la resistencia de puesta a tierra, realizamos un estudio de la viabilidad económica de cada una de estas alternativas.

9.1 COSTO ECONÓMICO DE LA REDUCCIÓN DE LA RESISTIVIDAD MEDIANTE PROCEDIMIENTOS ARTIFICIALES

9.1.1 Hidrosolta. Después de analizar las medidas de resistencia de puesta a tierra en aquellas torres que no cumplen con el valor requerido ($< 20 \Omega$), el fabricante recomienda según como se muestra en la siguiente tabla, la construcción de pozos de hidrosolta de 90 kg.

Tabla 8. Cantidad de pozos de hidrosolta para el mejoramiento de la resistencia de puesta a tierra en las torres.

TORRE	MEDIDA OBTENIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA [Ω]	CANTIDAD DE POZOS DE 90 kg DE HIDROSOLTA RECOMENDADA POR EL FABRICANTE
1	46,55	4
2	79,55	4
2A	24,35	2
3	70,85	4
6	70,9	4
8	68,43	4
9	354,5	4

Tabla 9. Costo económico de la aplicación de hidrosolta para el mejoramiento de la resistencia de puesta a tierra en las torres

TORRE	VALOR POZO DE 90 kg DE HIDROSOLTA POR UNIDAD [Pesos]	CANTIDAD	VALOR TOTAL
1	354 960	4	1 419 840
2	354 960	4	1 419 840
2A	354 960	2	709.920
3	354 960	4	1 419 840
6	354 960	4	1 419 840
8	354 960	4	1 419 840
9	354 960	4	1 419 840
COSTO TOTAL POZOS 90 KG			\$9' 228 960

9.1.2 ElectroPAT. Después de analizar las medidas de resistencia de puesta a tierra en aquellas torres que no cumplen con el valor requerido ($< 20 \Omega$), el fabricante recomienda tratamientos ElectroPAT tipo industrial en la cantidad que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 10. Cantidad de pozos industriales de ElectroPAT para el mejoramiento de la resistencia de puesta a tierra en las torres.

TORRE	MEDIDA OBTENIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA [Ω]	CANTIDAD DE POZOS INDUSTRIALES DE ELECTROPAT RECOMENDADA POR EL FABRICANTE
1	46,55	4
2	79,55	4
2A	24,35	2
3	70,85	4
TORRE	MEDIDA OBTENIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA [Ω]	CANTIDAD DE POZOS INDUSTRIALES DE ELECTROPAT RECOMENDADA POR EL FABRICANTE
6	70,9	4
8	68,43	4
9	354,5	4

Tabla 11. Costo económico de la aplicación de electroPAT para el mejoramiento de la resistencia de puesta a tierra en las torres.

TORRE	VALOR POZO INDUSTRIAL POR UNIDAD	CANTIDAD	VALOR TOTAL
1	627 328	4	2 509 312
2	627 328	4	2 509 312
2 A	627 328	2	1 254 656
3	627 328	4	2 509 312
6	627 328	4	2 509 312
8	627 328	4	2 509 312
9	627 328	4	2 509 312
COSTO TOTAL TRATAMIENTO VERTICALES			\$ 16' 310 528

9.1.3 Favigel. Después de analizar las medidas de resistencia de puesta a tierra en aquellas torres que no cumplen con el valor requerido ($< 20 \Omega$), el fabricante recomienda la aplicación de dosis de 50 kg de suelo artificial Favigel en la cantidad que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 12. Cantidad de Dosis de 50 kg De Favigel para el mejoramiento de la resistencia de puesta a tierra en las torres.

TORRE	MEDIDA OBTENIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA [Ω]	CANTIDAD DE DOSIS DE 50 kg DE FAVIGEL RECOMENDADA POR EL FABRICANTE
1	46,55	4
2	79,55	4
2 A	24,35	2
3	70,85	4
6	70,9	4
8	68,43	4
9	354,5	4

Tabla 13. Costo económico de la aplicación de Favigel para el mejoramiento de la resistencia de puesta a tierra en las torres.

TORRE	VALOR DOSIS DE 50		VALOR TOTAL
	kg POR ELECTRODO ENTERRADO	CANTIDAD	
1	250 560	4	1' 002 240
2	250 560	4	1' 002 240
2 A	250 560	2	501 120
3	250 560	4	1' 002 240
6	250 560	4	1' 002 240
8	250 560	4	1' 002 240
9	250 560	4	1' 002 240
COSTO TOTAL			\$ 6' 514 560

9.2 COSTO ECONÓMICO DE LA REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE LAS TORRES EMPLEANDO CONTRAPESOS

9.2.1 Cálculo teórico de los contrapesos. Después de analizar las medidas de resistencia de puesta a tierra en aquellas torres que no cumplen con el valor requerido ($< 20 \Omega$), se realizó un cálculo teórico para determinar las longitudes de los contrapesos a implementar y de esta manera calcular el costo económico de esta alternativa.

Empleando los valores de resistividad obtenidos y enunciados en la Tabla No. 4, se aplicó la siguiente fórmula de la sección 1.2.7.1.1 Figura No. 5, para determinar los valores teóricos de resistencia de puesta a tierra de los contrapesos a aplicar.

$$R = \frac{\rho}{4\pi L} * \operatorname{Ln}\left(\frac{2L}{a}\right) \left[1 + \frac{\operatorname{Ln}\left(\frac{L}{z}\right)}{\operatorname{Ln}\left(\frac{2L}{a}\right)} \right] [\Omega] \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

ρ = Resistividad del terreno (Ω -m)

$2L$ = Longitud del contrapeso (m)

a = Radio del contrapeso (m)

z = Profundidad de enterramiento del contrapeso (m)

Realizamos el cálculo tipo para los contrapesos a emplear en la torre No. 1:

En la torre No. 1 emplearemos 3 contrapesos de 25 m de longitud de cable cobre desnudo No 2, enterrados a una profundidad de 0,5 m

Tenemos:

$\rho = 430$ (Ω -m)

$2L = 25$ (m)

$a = 0,00327$ (m)

$z = 0,5$ (m)

$$R = \frac{430}{4\pi * 12,5} * \operatorname{Ln}\left(\frac{25}{0,00327}\right) \left[1 + \frac{\operatorname{Ln}\left(\frac{12,5}{0,5}\right)}{\operatorname{Ln}\left(\frac{25}{0,00327}\right)} \right] = 33,29\Omega$$

La resistencia de puesta a tierra del contrapeso de 25 m de longitud es de 33,29 Ω .

En la sección 6, determinamos una resistencia de la varilla de una de las 4 patas de la torre No. 1 de 205,92 Ω .

Así que procedemos a calcular la resistencia de puesta a tierra equivalente en la pata A de la torre No. 1, donde se encontraría conectada la varilla con el contrapeso, asumimos que estas dos resistencias se encuentran en paralelo:

$$ReqPataA = \frac{R\text{ varilla} * R\text{contrapeso}}{R\text{ varilla} + R\text{contrapeso}} = \frac{205,92 * 33,29}{205,92 + 33,29} = 28,66\Omega$$

De igual manera calculamos para la pata B y C de la torre, la resistencia equivalente obteniendo:

$$Req\text{ Pata B} = 28,66 \ \Omega.$$

$$Req\text{ Pata C} = 28,66 \ \Omega.$$

Como solo emplearemos 3 contrapesos la pata D, solo llevaría la varilla de puesta a tierra, por lo tanto:

$$Req\text{ Pata D} = 205,92 \ \Omega.$$

El siguiente paso es calcular la resistencia de puesta a tierra total de la torre No. 1, para lo cual las cuatro resistencias de puesta a tierra correspondientes a las cuatro patas de esta torre se encuentran en paralelo.

Así que para facilitar el cálculo, obtendremos primero el paralelo de las patas A y B, luego obtendremos el paralelo de las patas C y D, así:

$$ReqPataA - B = \frac{ReqPataA * ReqPataB}{ReqPataA + ReqPataB} = \frac{28,66 * 28,66}{28,66 + 28,66} = 14,33\Omega$$

$$ReqPataC - D = \frac{ReqPataC * ReqPataD}{ReqPataC + ReqPataD} = \frac{28,66 * 205,92}{28,66 + 205,92} = 25,16\Omega$$

Finalmente la resistencia de puesta a tierra total de la torre No. 1, es el paralelo de las dos resistencias calculadas anteriormente, así:

$$R_{torre1} = \frac{ReqPataA - B * ReqPataC - D}{ReqPataA - B + ReqPataC - D} = \frac{14,33 * 25,16}{14,33 + 25,16} = 9,13 \Omega$$

Del cálculo tipo anterior, podemos concluir que tres contrapesos de 25 m de longitud serían suficientes para disminuir la resistencia de puesta a tierra de la torre No. 1 a una valor menor al requerido (<20 Ω).

A continuación presentamos en la tabla No. 13 las longitudes y número de contrapesos seleccionados para el mejoramiento de la puesta a tierra de las torres.

Tabla 14. Selección de contrapesos para el mejoramiento de la resistencia de puesta a tierra en las torres.

TORRE	MEDIDA DE RESISTENCIA [Ω]	NÚMERO DE CONTRAPESOS DE 25 m DE LONGITUD	NÚMERO DE CONTRAPESOS DE 15 m DE LONGITUD	NÚMERO DE CONTRAPESOS DE 90 m DE LONGITUD
1	46,55	3		
2	79,55	3		
2 A	24,35	1		
TORRE	MEDIDA DE RESISTENCIA [Ω]	NÚMERO DE CONTRAPESOS DE 25 m DE LONGITUD	NÚMERO DE CONTRAPESOS DE 15 m DE LONGITUD	NÚMERO DE CONTRAPESOS DE 90 m DE LONGITUD
3	70,85	2		
6	70,9	2		
8	68,43	3	1	
9	354,5			3

De la misma forma como realizamos el cálculo tipo para los contrapesos a emplear en la torre No. 1, procedemos a llevar a cabo el cálculo para los contrapesos a emplear en el resto de las torres, de acuerdo a lo indicado en la tabla anterior.

Los resultados son presentados a continuación:

Tabla 15. Calculo teórico de la resistencia de puesta a tierra resultante después de la aplicación de contrapesos en las torres.

TORRE	RESISTENCIA DE LA JABALINA	RESISTENCIA CONTRAPESO 25 m	RESISTENCIA CONTRAPESO 15 m	RESISTENCIA CONTRAPESO 90 m	RESISTENCIA FINAL TORRE CON CONTRAPESOS
1	205,92	33,29			9,13
2	343,84	55,59			15,24
2 A	91,95	14,86			9,03
3	272,97	44,13			16,67
6	307,92	49,78			13,65
8	295,95	47,84	73,04		11,12
9	1224,04			65.,43	20,07

De la tabla anterior, podemos concluir que con las longitudes y número de contrapesos seleccionados obtendremos valores de resistencia de puesta a tierra que cumplan con el valor requerido (20Ω).

Con los contrapesos ya seleccionados podemos proceder a calcular el costo económico de esta alternativa empleada para mejorar la resistencia de puesta a tierra de las torres.

Tabla 16. Costo económico de la aplicación de contrapesos para el mejoramiento de la resistencia de puesta a tierra en las torres.

	LONGITUD TOTAL TORRE EN CONTRAPESOS (m)	VALOR CONTRAPESO POR METRO (PESOS)	VALOR TOTAL CONTRAPESO
1	75	5 046	378 450
2	75	5 046	378 450
2 A	25	5 046	126 150
3	50	5 046	252 300
6	50	5 046	252 300
8	90	5 046	454 140
9	270	5 046	1' 362 420
	COSTO TOTAL		\$ 3'204 210

9.3 RESULTADO OBTENIDO AL REALIZAR LA COMPARACION

Después de obtener los resultados económicos de cada una de las alternativas procedemos a realizar la comparación.

Tabla 17. Comparación de los costos económicos de los diferentes métodos para el mejoramiento de la resistencia de puesta a tierra en las torres.

COSTO TOTAL EMPLEANDO ELECTROPAT	\$ 16'310 528
COSTO TOTAL EMPLEANDO HIDROSOLTA	\$ 9'228 960
COSTO TOTAL EMPLEANDO FAVIGEL	\$ 6'514 560
COSTO TOTAL EMPLEANDO CONTRAPESOS	\$ 3'204 210

Como podemos observar en la tabla, concluimos que la opción mas económica de las presentadas, es el uso de contrapesos para la reducción del valor de resistencia de puesta a tierra, debido a esto, es la alternativa que seleccionaremos para realizar la reducción del valor de resistencia de puesta a tierra, en aquellas torres de transmisión en las cuales no se cumple el valor requerido.

10. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS MEDICIONES DE PUESTA A TIERRA DESPUÉS DE APLICAR LOS CONTRAPESOS

Tabla 18. Resultados de la aplicación de contrapesos en la resistencia de puesta a tierra en las torres.

TORRE	MEDICIONES SIN CONTRAPESOS			MEDICIONES CON CONTRAPESOS		
	MEDIDA	FECHA MEDICIÓN	CONDICIÓN DE TERRENO	MEDIDA	FECHA MEDICIÓN	CONDICIÓN DE TERRENO
1	46,55	04-Abr-04	Húmedo	16,35	21-Abr-04	Semi-húmedo
2	79,55	20-Mar-04	Seco	18,94	19-Abr-04	Húmedo
2 A	24,35	31-Mar-04	Semi-húmedo	8,40	23-Abr-04	Semi-húmedo
3	70,85	31-Mar-04	Húmedo	18,56	23-Abr-04	Semi-húmedo
4	3,48	31-Mar-04	Húmedo			
5	13,81	31-Mar-04	Húmedo			
6	70,9	20-Mar-04	Seco	18,97	23-Abr-04	Semi-húmedo
7	18,58	03-Abr-04	Húmedo			
8	68,425	03-Abr-04	Húmedo	18,85	23-Abr-04	Semi-húmedo
9	354,5	03-Abr-04	Húmedo	19,20	03-May-04	Semi-húmedo
10	8,415	01-Abr-04	Seco			
11	2,83	01-Abr-04	Semi-húmedo			
12	1,875	01-Abr-04	Semi-húmedo			
13	2,945	01-Abr-04	Seco			
14	2,115	02-Abr-04	Semi-húmedo			
14 A	7,5	02-Abr-04	Semi-húmedo			
15	2,42	02-Abr-04	Seco			
16	13,12	02-Abr-04	Seco			
17	11,75	22-abr-04	Semi-húmedo			
17 A	2,5	12-Abr-04	Semi-húmedo			
18	19,2	12-Abr-04	Seco			
18 A	7,55	12-Abr-04	Semi-húmedo			
19	9,77	16-Mar-04	Seco			
20	9,77	12-Abr-04	Semi-húmedo			
21	12,38	16-Mar-04	Seco			
22	16,07	16-Mar-04	Seco			

10.1 COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DESPUÉS DE APLICAR LOS CONTRAPESOS CALCULADOS TEORICAMENTE CONTRA LOS VALORES OBTENIDOS A TRAVES DE LA MEDICIÓN

En la siguiente tabla presentamos los valores calculados teóricamente de la Tabla No.14, junto con los valores obtenidos a través de la medición mostrados en la tabla anterior y el cálculo del error porcentual.

Tabla. 19. Comparación de los valores teóricos de resistencia de puesta a tierra con el uso de contrapesos teóricos contra los valores medidos.

TORRE	RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA TEORICA CON CONTRAPESOS (Ohmios)	RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA MEDIDA CON CONTRAPESOS (Ohmios)	ERROR PORCENTUAL
1	9,13	16,35	44,17%
2	15,24	18,94	19,52%
2A	9,03	8,40	7,46%
3	16,67	18,56	10,17%
6	13,65	18,97	28,04%
8	11,12	18,85	41,00%
9	20,07	19,20	4,52%

Si bien es cierto que el cálculo teórico de la resistencia de puesta a tierra contrastado contra el valor medido en algunas torres presenta un alto error porcentual, debido que el suelo a lo largo de la longitud del contrapeso no presenta una resistividad uniforme, este cálculo teórico del comportamiento de la resistencia de puesta a tierra al adicionar contrapesos, es una guía importante para poder tomar una decisión al elegir las longitudes de los contrapesos que logran obtener un valor de resistencia de puesta a tierra menor al valor requerido (20Ω).

10.2 REGISTROS DE CONTRAPESOS INSTALADOS

Figura 30. Registro de los contrapesos en la torre 1.


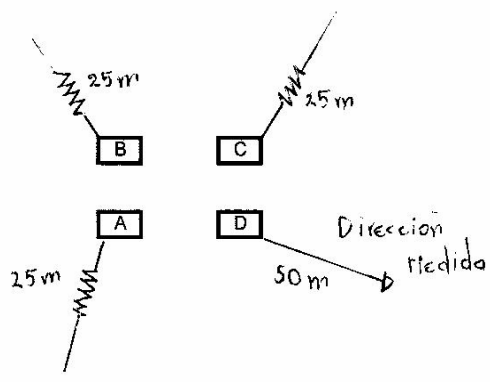

	J. E. JAIMES INGENIEROS S.A.					
MEDICIONES DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA CON CONTRAPESOS		Abril de 2004	Pagina 1 de 1			
FECHA	<u>21/04/04</u>					
ELABORÓ	<u>Fernando Charanga Delgado</u>	CARGO	<u>Aux. Ing.</u>			
Lugar de medición:	<u>Torre 1</u>					
Estado Superficial del terreno:	Húmedo <input type="checkbox"/>	Seco <input type="checkbox"/>				
	Semi - húmedo <input checked="" type="checkbox"/>					
Equipo utilizado:	<u>Megger HT Geotest 2016</u>					
ESQUEMA DE CONTRAPESOS INSTALADOS						
						
MEDICION PARA VERIFICACION DE CONTRAPESOS						
LECTURAS OBTENIDAS						
PATA	1	2	3	4	5	PROMEDIO
C	16,06	16,65				16,35 Ω
VALOR DEFINITIVO DE PUESTA A TIERRA						<u>16,35 Ω</u>
OBSERVACIONES: <u>Medida en presencia y verificada por el Ing Ivan Jaramillo</u>						
FIRMA: <u></u>						

Figura 33. Registro de los contrapesos en la torre 3.



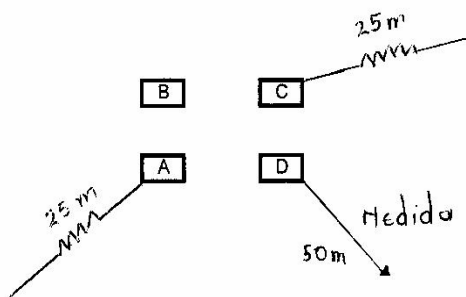
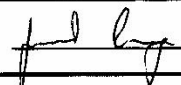
		J. E. JAIMES INGENIEROS S.A				
MEDICIONES DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA CON CONTRAPESOS		Abril de 2004	Pagina 1 de 1			
FECHA	23/04/04					
ELABORÓ	Fernando Chanaga D.		CARGO	Aux. Ing.		
Lugar de medición:	Torre 3					
Estado Superficial del terreno:	Húmedo	<input type="checkbox"/>	Seco	<input type="checkbox"/>		
	Semi - húmedo	<input checked="" type="checkbox"/>				
Equipo utilizado:	Megger HT Geotest 2016					
ESQUEMA DE CONTRAPESOS INSTALADOS						
						
MEDICION PARA VERIFICACION DE CONTRAPESOS						
LECTURAS OBTENIDAS						
PATA	1	2	3	4	5	PROMEDIO
D	18,71	18,42				18,56 Ω
VALOR DEFINITIVO DE PUESTA A TIERRA						18,56 Ω
OBSERVACIONES:						
<hr/> <hr/> <hr/>						
FIRMA:						

Figura 34. Registro de los contrapesos en la torre 6.



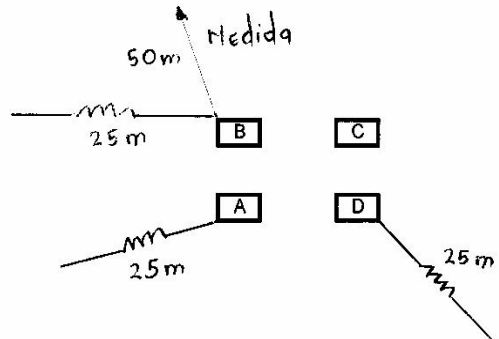



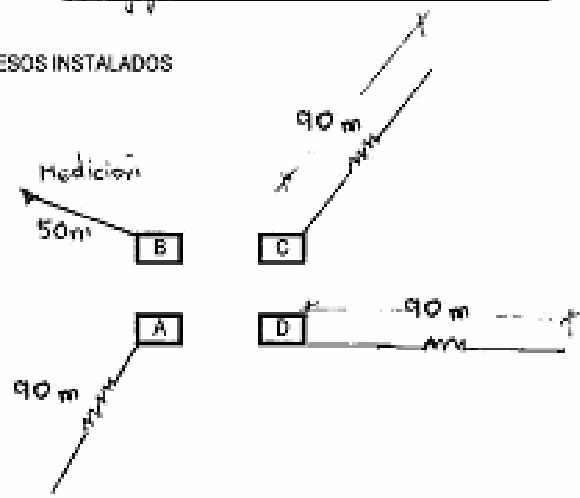
		J. E. JAIMES INGENIEROS S.A				
MEDICIONES DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA CON CONTRAPESOS			Abril de 2004	Página 1 de 1		
FECHA	Abril 23 de 2004					
ELABORÓ	Fernando Chanaga D		CARGO	Aux. Ing.		
Lugar de medición:	Torre 6					
Estado Superficial del terreno:	Húmedo	<input type="checkbox"/>	Seco	<input type="checkbox"/>		
	Semi-húmedo	<input checked="" type="checkbox"/>				
Equipo utilizado:	Megger HT Gcotest 2016					
ESQUEMA DE CONTRAPESOS INSTALADOS						
						
MEDICION PARA VERIFICACION DE CONTRAPESOS						
LECTURAS OBTENIDAS						
PATA	1	2	3	4	5	PROMEDIO
B	18,90	19,05				18,97Ω
VALOR DEFINITIVO DE PUESTA A TIERRA						18,97Ω
OBSERVACIONES:						
FIRMA: 						

Figura 36. Registro de los contrapesos en la torre 9.

		J. E. JAMES INGENIEROS S.A.				
MEDICIONES DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA CON CONTRAPESOS		Abril de 2004	Pagina 1 de 1			
FECHA <u>3 de Mayo/2004</u>						
ELABORÓ <u>Fernando Chaneqa D.</u>		CARGO <u>Aux. Ing.</u>				
Lugar de medición: <u>Torre 9</u>						
Estado Superficial del terreno: Húmedo <input type="checkbox"/> Seco <input type="checkbox"/>						
Semi-húmedo <input checked="" type="checkbox"/>						
Equipo utilizado: <u>Megger HT Geotest 2016</u>						
ESQUEMA DE CONTRAPESOS INSTALADOS						
						
MEDICION PARA VERIFICACION DE CONTRAPESOS						
LECTURAS OBTENIDAS						
PATA	1	2	3	4	5	PROMEDIO
B	19,2					19,2 Ω
VALOR DEFINITIVO DE PUESTA A TIERRA						<input style="width: 100px;" type="text" value="19,2 Ω"/>
OBSERVACIONES: _____ _____ _____						
FIRMA: <u>Fernando Chaneqa D.</u>						

10.3 FOTOGRAFÍAS DEL PROCESO DE INSTALACIÓN DE LOS CONTRAPESOS

A continuación podemos observar algunas fotografías tomadas en el proceso de instalación de los contrapesos:

Figura 37. Fotografía de excavación de la zanja para la instalación de los contrapesos. Vista lateral.



Figura 38. Fotografía de excavación de la zanja para la instalación de los contrapesos. Vista frontal.



Figura 39. Fotografía de la zapata de una torre con su respectiva puesta a tierra durante la excavación.



Figura 40. Fotografía final de la zapata de la torre con su respectiva puesta a tierra.



11. CONCLUSIONES

De acuerdo a lo expuesto en el marco teórico en esta monografía, se puede concluir que una de las funciones que cumple la puesta a tierra en la línea de transmisión, es derivar a tierra parte de la corriente proveniente de las descargas atmosféricas que impactan la línea de transmisión. En síntesis la puesta a tierra forma parte fundamental de la protección de la línea de transmisión contra descargas atmosféricas.

Según lo presentado en el marco teórico, dentro de las alternativas para disminuir la influencia de la tensión inducida por descargas atmosféricas en la línea de transmisión, se encuentra la baja resistencia de puesta a tierra del conductor de guarda, de ahí la importancia de obtener un bajo valor de resistencia de puesta a tierra en las torres de la línea de transmisión.

Los tres factores más importantes en la construcción de un buen sistema de puesta a tierra son la sección del conductor, la superficie de contacto y la resistividad del terreno. De acuerdo al trabajo desarrollado a través de esta monografía, podemos concluir que el factor que tiene mayor incidencia en el sistema de puesta a tierra es la resistividad del terreno.

Por el valor de resistencia de puesta a tierra requerido en las especificaciones técnicas ($\leq 20\Omega$), para las torres de la línea de transmisión El Morro – Yopal, fue suficiente el uso de los contrapesos en aquellas torres que no cumplían con el valor requerido, aunque la segunda alternativa presentada, la reducción de la resistividad del suelo mediante procedimientos artificiales patentados tales como Hidrosolta, Favigel y ElectroPAT, también hubiese brindado una solución técnica al problema planteado.

Se realizó un análisis económico de las diferentes alternativas presentadas para reducir el valor de resistencia de puesta a tierra, con el objetivo de determinar el costo económico de cada una de ellas, llegando a la conclusión de que la alternativa mas económica para el valor solicitado es la reducción del valor de puesta a tierra a través del uso de contrapesos, seleccionando esta alternativa por presentar el mas bajo costo.

Se adquirió experiencia laboral valiosa en las áreas operativas y administrativas dentro de una organización empresarial, como lo es J.E. Jaimes Ingenieros, cumpliendo con los requisitos que exige la Universidad Industrial de Santander para optar al título de ingeniero electricista.

BIBLIOGRAFÍA.

CASAS OSPINA, Favio. TIERRAS Soportes de la seguridad, Seguridad Eléctrica EDITORES Ltda., Bogotá, DC; Segunda Edición, Junio de 2003.

DÍAZ RAMÍREZ, Jorge. Influencia de las sobretensiones por descargas atmosféricas y comportamiento de los sistemas de puesta a tierra en líneas aéreas de transmisión y distribución, Universidad Simón Bolívar, Grupo de Investigación en Alta Tensión, Venezuela, Enero de 2000.

DÍAZ, Pablo. Soluciones Prácticas para la Puesta a Tierra de Sistemas Eléctricos de distribución, McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., Primera Edición, México, Febrero de 2001.

GARCÍA MÁRQUEZ, Rogelio. La Puesta a Tierra de Instalaciones Eléctricas, ALFAOMEGA GRUPO EDITORIAL S.A. de C.V., México, 1999.

ICONTEC - Código Eléctrico Colombiano NTC. 2050, Primera Actualización.1998,

ICONTEC –Presentación de Trabajos, Proyectos Y Tesis de grado NTC Primera Actualización.1997.

ICONTEC -Requisitos para la conexión y continuidad de tierra para telecomunicaciones en construcciones comerciales NTC 4171, Primera Actualización.1997.

Manual de Instrucciones Geotest -2016.

PROCOBRE – Sistemas de Puesta a Tierra, Centro de Promoción de Usos del Cobre, Perú, 2002.

RÚELAS, Roberto. Teoría y diseño de sistemas de tierras según las normas NOM. E IEEE.