

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**PROPUESTA DE MANUAL DE DISEÑO DE REDES DE TIERRA PARA
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN Y SUBTRANSMISIÓN DESDE 46kV A
230kV**

PRESENTADO POR:

RICARDO ARÍSTIDES CHACÓN DE PAZ

PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL DE 2026

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

MSC. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO:

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR:

ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TRABAJO DE GRADUACIÓN PREVIO A LA OPCIÓN AL GRADO DE:
INGENIERO ELECTRICISTA

TÍTULO:

**PROPUESTA DE MANUAL DE DISEÑO DE REDES DE TIERRA PARA
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN Y SUBTRANSMISIÓN DESDE 46kV A
230kV**

PRESENTADO POR:

RICARDO ARÍSTIDES CHACÓN DE PAZ

TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR:

DOCENTE ASESOR:

ING. NUMA POMPILIO JIMÉNEZ CORTEZ

SAN SALVADOR, ABRIL DE 2026

TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR:

DOCENTE ASESOR:

ING. NUMA POMPILIO JIMÉNEZ CORTEZ

NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, viernes 13 de marzo de 2026, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 4:30 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Werner David Meléndez Valle
Director


Firma


2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario


Firma

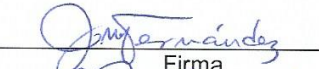


Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

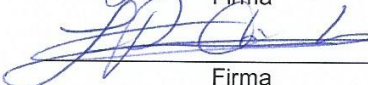
- ING. NUMA POMPILIO JIMÉNEZ CORTEZ
(Docente Asesor)


Firma

- ING. JOSÉ MIGUEL HERNÁNDEZ


Firma

- MSC. LUIS ROBERTO CHÉVEZ PAZ


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

PROPUESTA DE MANUAL PARA EL DISEÑO DE REDES DE TIERRA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN Y SUBTRANSMISIÓN DESDE 46KV A 230KV

A cargo del Bachiller:

CHACÓN DE PAZ RICARDO ARÍSTIDES

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 9.4
(*Nueve punto cuatro*)

Agradecimientos

A mi familia, por haberme permitido ser y moldearme para poder llegar hasta acá.

A mi mamá, que sin su diario apoyo e infaltable presencia me movió todos los días. A mi papá, que sirvió de inspiración y guía en este camino de ingeniería y proyectos. A mi hermana, por su constante apoyo que incluso en su voluntad de ayudarme, aprendió a usar instrumentos de mi carrera. A mis abuelas y tíos, por siempre estar.

A Carlos, con quien básicamente hemos hecho la carrera juntos y que su amistad ha facilitado y hecho mucho más llevadero el aprobar todas las materias de la carrera.

A Cristina, por su apoyo y compañía en este último pero extenuante tramo de la carrera.

A mis compañeros y amigos de trabajo, sobre todo a Gabriela, por permitirme tener la flexibilidad de poder realizar mi trabajo y mis obligaciones de la carrera en simultáneo.

Al Ing. Numa Jiménez, mi asesor; por facilitar el conocimiento y el proceso de desarrollo del trabajo de graduación, brindando aspectos claves para poder concluir de manera satisfactoria mi carrera.

A Reinita Vides, por toda su ayuda y guía que ha sido clave para poder llevar a cabo este trabajo.

Al Ing. Francisco González y su equipo de trabajo, por brindarme la oportunidad de conocer de cerca el proceso constructivo y de mantenimiento de las redes de puesta a tierra en líneas de transmisión.

Finalmente, a todas las demás personas que compartieron tiempo conmigo y que conocí en la carrera y en IEEE, han brindado aportes pequeños, pero que al final han sumado para llegar a este final.

Gracias.

Índice de Contenidos

Capítulo 1 Aspectos Generales.....	1
1.1 Descripción del Tema.....	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Alcances.....	2
1.4 Antecedentes	2
1.5 Planteamiento del Problema	3
1.6 Justificación.....	3
1.7 Definiciones.....	4
1.8 Referencias Normativas	6
Capítulo 2 - Líneas de Subtransmisión, Transmisión y Redes de Puesta a Tierra	8
2.1 Líneas de Subtransmisión y Transmisión	8
2.1.1 Niveles de Voltaje	8
2.2 Líneas de Subtransmisión y Estructuras en El Salvador	9
2.3 Líneas de Transmisión y Estructuras en El Salvador	10
2.4 Redes de Puesta a Tierra	14
2.4.1 Resistividad del Suelo	15
2.4.2 Resistencia de Puesta a Tierra	16
2.5 Modelado de Suelo.....	16
2.5.1 Modelo de Suelo Uniforme	17
2.5.2 Modelo de Dos Capas	17
2.6 Consideraciones de Seguridad	18
2.6.1 Modelo de Dalziel	18
2.7 Descargas Atmosféricas.....	19
2.7.1 Nivel Isoceraúnico	20
2.7.2 Apantallamiento	21
2.7.3 Programa Flash 2.0 – IEEE	22
2.8 CYMGRD	22
2.8.1 Análisis por Elementos Finitos.....	23
2.9 Sondeo Eléctrico Vertical	24

Capítulo 3 - Propuesta de Manual de Diseño	26
3.1 Objetivo	26
3.2 Campo de Aplicación	26
3.3 Características y Criterios Generales	26
3.4 Arreglos para Torres Autosoportadas	30
3.5 Arreglos para Postes Troncónicos	35
3.6 Proceso de Diseño	36
3.7 Principales Consideraciones de Diseño	38
3.8 Características del Suelo.....	39
3.9 Selección de Conductores y Conexiones.....	41
3.10 Aterrizamiento	43
3.11 Condiciones de Operación	44
3.12 Consideraciones para Mediciones de Campo de una Puesta a Tierra.....	44
3.13 Diseño en Condiciones Difíciles.....	45
3.14 Mantenimiento e Integridad del Sistema.....	46
3.15 Anexo A. Medición de Resistividad del Suelo.....	46
A.1 Método de Wenner	46
3.16 Anexo B. Medición de Resistencia de Red de Tierra	48
B.1 Método de Caída de Potencial.....	48
3.17 Anexo C. Longitud Efectiva Ante Descargas Atmosféricas.....	49
3.18 Anexo D. Cálculo de conductor de tierra.....	51
Capítulo 4 - Análisis y Comparativa, Modelado por Software	54
4.1 Notas. Estado Actual.....	54
4.2 Comparativa. Modelado por Software.	56
4.2.1 Estructuras Auto Soportadas.....	59
4.2.2 Postes Troncónicos.....	67
Capítulo 5 - Cálculo y Reporte, Diseño de Redes de Tierra.....	72
5.1 Cálculo de Resistencia de Tierra	72
5.2 CPAR - Herramienta de Cálculo de Resistencia de Puesta a Tierra.....	78
5.2.1 Validación - Estructuras auto soportadas.....	82

5.2.2 Validación - Postes tronónicos	89
5.3 Reporte de Diseño.....	94
5.4 Análisis de Desempeño a Rayos.....	94
5.4.1 Flash 2.0 – Estructuras Autosoportadas	96
5.4.2 Flash 2.0 - Postes tronónicos.....	99
Bibliografía	104
Conclusiones	105
Recomendaciones.....	109
Anexos. Formatos de Reporte de Medición	111
Anexos. Diagrama de Flujo, Lógica CPAR.....	108

Índice de Tablas

Tabla 3.1- Profundidad de Contra-Antenas En Función del Suelo.....	27
Tabla 3.2 - Criterios de Aceptación para Arreglos de Puesta a Tierra Según Tipo de Estructura	27
Tabla 3.3 - Longitud y Cantidad de Elementos de Contra-Antenas para Torres Autosoportadas	28
Tabla 3.4 - Longitud y Cantidad de Elementos de Contra-Antenas para Postes Troncónicos	28
Tabla 3.5 - Especificaciones de Materiales para Arreglos de Red de Puesta a Tierra.....	28
Tabla 4.1 - Resultados Para Simulación en CYMGRD Para Resistividad de Suelo de 100Ω-m	61
Tabla 4.2 - Resultados Para Simulación en CYMGRD Para Resistividad de Suelo de 300Ω-m	62
Tabla 4.3 - Resultados Para Simulación en CYMGRD Para Resistividad de Suelo de 500Ω-m	64
Tabla 4.4 - Resultados Para Simulación en CYMGRD Para Resistividad de Suelo de 750Ω-m	65
Tabla 4.5 - Resultados Para Simulación en CYMGRD Para Resistividad de Suelo de 1000Ω-m.....	67
Tabla 4.6- Resultados Para Simulación en CYMGRD de Arreglo PT2 Para Resistividad de Suelo de 300Ω-m	68
Tabla 4.7 - Resultados Para Simulación en CYMGRD de Arreglo PT2 para Resistividad de Suelo de 500Ω-m	70
Tabla 4.8 - Resultados Para Simulación en CYMGRD Para Resistividad de Suelo de 1000Ω-m.....	71
Tabla 5.1 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Estructuras Auto Soportadas: CYMGRD vs CPAR – Profundidad de Enterramiento: 0.4m	85
Tabla 5.2 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Estructuras Auto Soportadas: CYMGRD vs CPAR - Profundidad de Enterramiento: 0.8m	87
Tabla 5.3 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Estructuras Auto Soportadas: CYMGRD vs CPAR - Profundidad de Enterramiento: 1.5m	89
Tabla 5.4 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Postes Troncónicos: CYMGRD vs CPAR – Profundidad de Enterramiento: 0.4m.....	91
Tabla 5.5 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Postes Troncónicos: CYMGRD vs CPAR - Profundidad de Enterramiento: 0.8m	92
Tabla 5.6 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Postes Troncónicos: CYMGRD vs CPAR - Profundidad de Enterramiento: 1.5 m.....	93

Índice de Figuras

Figura 2.3 - Mapa De Subestaciones y Líneas de Transmisión en El Salvador – Imagen: ETESAL	11
Figura 2.4 - Ubicación de Estructura Autoportada, 115kV	11
Figura 2.5 - Estructura Autoportada del Sistema de Transmisión de El Salvador, 115kV, 2 circuitos. Ubicada en Santa Tecla, La Libertad Sur.....	12
Figura 2.6 - Ubicación de Tramo de Línea a 115kV Usando Postes Troncónicos.....	12
Figura 2.7 - Tramo de Línea a 115kV con Postes Troncónicos. Cercanías de Subestación San Bartolo ETESAL, Ilopango, San Salvador Este.....	13
Figura 2.8 - Ubicación Estructura Autoportada 230kV.....	13
Figura 2.9 - Estructura Autoportada del Sistema de Transmisión de El Salvador, 230kV, 4 circuitos. Ubicada en Nejapa, San Salvador Oeste.....	14
Figura 2.10 - Impulso Estándar de Onda de Rayo	19
Figura 2.11 - Mapa Isoceraúnico de El Salvador	20
Figura 2.12 - Definición de Ángulo de Apantallamiento.....	21
Figura 3.1 - Arreglo AS1. Red de Puesta a Tierra para Estructura Auto Soportada de Línea de Transmisión con Suelo con Resistividad de Diseño Entre 1 y 100 Ω -m	31
Figura 3.2 - Arreglo AS2. Red de Puesta a Tierra para Estructura Auto Soportada de Línea de Transmisión con Suelo con Resistividad de Diseño Entre 101 y 300 Ω -m.....	32
Figura 3.3 - Arreglo AS3. Red de Puesta a Tierra para Estructura Auto Soportada de Línea de Transmisión con Suelo con Resistividad de Diseño Entre 301 y 500 Ω -m.....	33
Figura 3.4 - Arreglo AS4. Red de Puesta a Tierra para Estructura Auto Soportada de Línea de Transmisión con Suelo con Resistividad de Diseño Entre 501 y 750 Ω -m.....	34
Figura 3.5 - Arreglo AS5. Red de Puesta a Tierra para Estructura Auto Soportada de Línea de Transmisión con Suelo con Resistividad de Diseño de 750 Ω -m en Adelante.....	34
Figura 3.6 - Arreglo PT1. Red de Puesta a Tierra para Poste Troncónico de Línea de Transmisión con Suelo con Resistividad de Diseño Entre 1 y 300 Ω -m	35
Figura 3.7 - Arreglo PT2. Red de Puesta a Tierra para Poste Troncónico de Línea de Transmisión con Suelo con Resistividad de Diseño Entre 301 y 500 Ω -m.....	36
Figura 3.8 - Arreglo PT3. Red de Puesta a Tierra para Poste Troncónico de Línea de Transmisión con Suelo con Resistividad de Diseño de 501 Ω -m en Adelante.....	36
Figura 3.9 - Direcciones Preferentes para Medición de Resistencia de Red de Tierra para Torres Auto Soportadas	38
Figura 3.10 - Direcciones Preferentes para Medición de Resistencia de Red de Tierra para Postes Troncónicos.....	38
Figura 3.11 - Modelo de Circuito de Suelo.....	40
Figura 3.12 - Efectos de la Humedad, Temperatura y Sal en la resistividad del suelo	41

Figura 3.13 - Método de Wenner para Medición de Resistividad de Suelo	47
Figura 3.14 - Método de Caída de Potencial para Medición de Resistencia de Red de Puesta a Tierra	48
Figura 4.1 – Vista en Planta de Arreglo AS1 en CYMGRD para una Estructura Auto Soportada en un Terreno Con Resistividad Entre 1 y 100 Ω -m	60
Figura 4.2 – Vista en 3D de Arreglo AS1 en CYMGRD para una Estructura Auto Soportada en un Terreno Con Resistividad Entre 1 y 100 Ω -m.....	60
Figura 4.3 - Vista en Planta de Arreglo AS2 en CYMGRD para una Estructura Auto Soportada en un Terreno Con Resistividad Entre 101 y 300 Ω -m.....	61
Figura 4.4 - Vista en 3D de Arreglo AS2 en CYMGRD para una Estructura Auto Soportada en un Terreno Con Resistividad Entre 101 y 300 Ω -m	62
Figura 4.5 - Vista en Planta de Arreglo AS3 en CYMGRD para una Estructura Auto Soportada en un Terreno Con Resistividad Entre 301 y 500 Ω -m.....	63
Figura 4.6 - Vista en 3D de Arreglo AS3 en CYMGRD para una Estructura Auto Soportada con Resistividad Entre 301 y 500 Ω -m	63
Figura 4.7 - Vista en Planta de Arreglo AS4 en CYMGRD para una Estructura Auto Soportada en un Terreno Con Resistividad Entre 501 y 750 Ω -m.....	64
Figura 4.8 - Vista en 3D de Arreglo AS4 en CYMGRD para una Estructura Auto Soportada en un Terreno Con Resistividad Entre 501 y 750 Ω -m	65
Figura 4.9 - Vista en Planta de Arreglo AS5 en CYMGRD para una Estructura Auto Soportada en un Terreno Con Resistividad Mayor a 750 Ω -m	66
Figura 4.10 - Vista en 3D de Arreglo AS5 en CYMGRD para una Estructura Auto Soportada en un Terreno Con Resistividad Mayor a 750 Ω -m.....	66
Figura 4.11 - Vista en Planta de Arreglo PT1 en CYMGRD Para un Poste en un Terreno Con Resistividad Entre 1 y 300 Ω -m.....	67
Figura 4.12 - Vista en 3D de Arreglo PT1 en CYMGRD Para un Poste en un Terreno Con Resistividad Entre 1 y 300 Ω -m.....	68
Figura 4.13 - Vista en Planta de Arreglo PT2 en CYMGRD Para un Poste en un Terreno Con Resistividad Entre 301 y 500 Ω -m	69
Figura 4.14 - Vista en 3D de Arreglo PT2 en CYMGRD Para un Poste en un Terreno Con Resistividad Entre 301 y 500 Ω -m	69
Figura 4.15 -Vista en Planta de Arreglo PT3 en CYMGRD Para un Poste en un Terreno Con Resistividad Mayor a 501 Ω -m.....	70
Figura 4.16 - Vista en 3D de Arreglo PT3 en CYMGRD Para un Poste en un Terreno Con Resistividad Mayor a 501 Ω -m.....	71
Figura 5.1 - Ventana de Ejecución CPAR	79
Figura 5.2 - Interfaz Gráfica de CPAR - Cálculos Personalizados	81
Figura 5.3 - Reporte de Cálculo CPAR - Diseño Recomendado y Diseño Personalizado....	82

Figura 5.4 - Gráfica de Porcentaje de Error entre CYMGRD y CPAR para Estructuras Autosoportadas	83
Figura 5.5 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Estructuras Auto Soportadas: CYMGRD vs CPAR - Profundidad de Enterramiento: 0.4m	84
Figura 5.6 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Estructuras Auto Soportadas: CYMGRD vs CPAR - Profundidad de Enterramiento: 0.8m	86
Figura 5.7 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Estructuras Auto Soportadas: CYMGRD vs CPAR - Profundidad de Enterramiento: 1.5m	88
Figura 5.8 - Gráfica de Porcentaje de Error entre CYMGRD y CPAR para Postes Troncónicos	90
Figura 5.9 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Postes Troncónicos: CYMGRD vs CPAR – Profundidad de Enterramiento: 0.4m	91
Figura 5.10 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Postes Troncónicos: CYMGRD vs CPAR Profundidad de Enterramiento: 0.8m	92
Figura 5.11 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Postes Troncónicos: CYMGRD vs CPAR - Profundidad de Enterramiento: 1.5 m.....	93
Figura 5.12 - Estructura Modelo Usada Para Análisis de Desempeño a Rayos de Líneas de 230kV	97
Figura 5.13 - Captura de Pantalla de Flash 2.0, Simulación de Desempeño a Rayos de una Línea de Transmisión de 230kV en Estructura Autosoportada, Resistencia de Tierra: 10Ω	98
Figura 5.14 - Captura de Pantalla de Flash 2.0, Simulación de Desempeño a Rayos de una Línea de Transmisión de 115kV en Poste Troncónico, Resistencia de Tierra: 30Ω	100
Figura 5.15 - Captura de Pantalla de Flash 2.0, Simulación de Desempeño a Rayos de una Línea de Transmisión de 115kV en Poste Troncónico, Resistencia de Tierra: 25Ω	101
Figura 5.16 - Captura de Pantalla de Flash 2.0, Simulación de Desempeño a Rayos de una Línea de Transmisión de 115kV en Poste Troncónico, Resistencia de Tierra: 20Ω	102

Capítulo 1 Aspectos Generales

1.1 Descripción del Tema

Las líneas de transmisión y subtransmisión son elementos vitales para el transporte de grandes bloques de energía que llegan a las ciudades, poblaciones rurales y parques industriales, siendo requeridos niveles de confiabilidad más altos para mantener la continuidad del servicio. Un elemento que aporta a una alta confiabilidad es el sistema de puesta a tierra, el cuál debe ser construido bajo criterios de ingeniería a fin de poder brindar un correcto funcionamiento ante sobretensiones y evitar interrupciones en el servicio, daños al sistema eléctrico o a sus usuarios. Se requiere de una norma que recomiende los lineamientos de diseño de líneas aéreas de transmisión y subtransmisión que establezca el valor requerido de resistencia de tierra, criterios de diseño, método de cálculo, configuraciones, recomendaciones de mantenimiento y técnicas de mejora de la red de tierra; para un adecuado desempeño al impacto de descargas atmosféricas y el paso de corriente de cortocircuito durante las fallas, integrando conceptos de normativas internacionales y análisis comparativo con las condiciones de El Salvador.

1.2 Objetivos

General

- Desarrollar un manual destinado al diseño, construcción, medición, mejoramiento y mantenimiento de redes de tierra para líneas aéreas de alta tensión que establezca el valor requerido de resistencia de tierra, de líneas de transmisión y subtransmisión de 46kV a 230 kV

Específicos

1. Establecer las configuraciones recomendadas de redes de tierra para líneas de 46 a 230kV.
2. Definir los métodos de medición de la resistividad del suelo, métodos de interpretación para establecer el valor a usar en el diseño y de medición de la resistencia de tierra, siguiendo la recomendación de normas IEEE.
3. Establecer el valor recomendado de puesta a tierra y criterios para establecer una “buena” y una “mala” puesta a tierra.
4. Aplicar el programa FLASH de IEEE para evaluar el efecto del valor de resistencia de tierra en el desempeño al impacto de rayos.

5. Definir criterios prácticos para la adecuada operación de las redes de tierra construidas en el derecho de servidumbre de calles y carreteras, como también dentro de terrenos privados.
6. Proponer los materiales y accesorios recomendados para la construcción de redes de tierra de líneas aéreas de 46 a 230kV.
7. Analizar e incorporar en el manual métodos de cálculo de redes de tierra, desarrollando una herramienta de cálculo y reporte que complemente el programa FLASH de la IEEE.

1.3 Alcances

1. Realizar una propuesta de manual de diseño de redes de tierra para líneas aéreas de transmisión y subtransmisión basada en normas internacionales (IEC e IEEE) considerando los voltajes de transmisión y subtransmisión utilizados en El Salvador.
2. Entrevistar a profesionales practicantes en el diseño y construcción de redes de tierra.
3. Estudiar con el programa FLASH 2.0 de IEEE el efecto de la resistencia de puesta a tierra en el desempeño de las líneas de transmisión a los rayos.
4. Aplicar los requerimientos de seguridad del National Electric Safety Code – NESC, relacionado a la puesta a tierra de líneas aéreas.
5. Aplicar los modelos de cálculo de la norma IEEE Std 1243, modelos de A. Hileman (Insulation Coordination for Power Systems) y de la Especificación CFE No. 00J00-52.
6. Investigar con el personal técnico de las empresas eléctricas involucradas la técnica de construcción de redes de tierra prácticas para las líneas aéreas bajo estudio.

1.4 Antecedentes

En El Salvador y específicamente en la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador, se han realizado investigaciones académicas y prácticas para el análisis, diseño, simulación y medición de redes de tierra basadas en normas, entre las cuales se encuentran la IEEE Std 80, IEEE Std 142, IEEE Std 81 y otras, usando métodos electromagnéticos, analíticos simplificados y de elementos finitos para el análisis de redes de tierra enfocado principalmente a subestaciones en las cuales los requerimientos de seguridad y desempeño.

Sin embargo, hasta el momento en El Salvador para líneas de transmisión no existe ninguna guía de diseño, ni compendio de reglas de diseño y construcción, ni método estándar. Por esta razón, es que se debe recurrir a normas de otros países, artículos técnicos especializados o libros para poder obtener una guía en el tema. En subtransmisión a 46kV

se cuenta con un estándar de construcción, sin embargo, éste estándar no posee el suficiente detalle y criterios para lograr un mejor desempeño de dichas líneas, ni referencias respecto a los sistemas de tierra; los rayos es la principal causa de falla en las líneas de subtransmisión. Las reglas de seguridad para redes de tierra toman como base el National Electric Safety Code (NESC, por sus siglas en inglés) que ha servido para establecer los requerimientos de puesta a tierra en el acuerdo de SIGET No 29-E-2000 que aplica a circuitos de subtransmisión de 46 kV en nuestro país; por ejemplo, que por cada milla de línea (1.6km) se deben tener al menos 4 conexiones a tierra en el neutro, y que los conductores no portadores de corriente que llegan a un poste tales como, el conductor neutro, conductor de guarda y conductor mensajeros deben estar en unión equipotencial, verificar la aplicación de la tierra efectivamente aterrizado tomando en cuenta los valores de impedancias de secuencia positiva, negativa y cero.

1.5 Planteamiento del Problema

En regiones tropicales, las líneas de transmisión y subtransmisión de 46 kV a 230 kV enfrentan un riesgo elevado de fallas debido a la alta incidencia de descargas atmosféricas durante tormentas eléctricas. La falta de un manual unificado que integre normativas internacionales y locales, y que esté adaptado a estas condiciones específicas, dificulta el diseño de sistemas de puesta a tierra eficientes y seguros. En El Salvador no se dispone de un manual que integre recomendaciones para el cálculo, diseño, construcción, medición y mejoramiento de la red de tierra que permita un buen rendimiento de redes de tierra para líneas de transmisión y subtransmisión. No se hace el uso de programas recomendados por la IEEE, como el programa FLASH para realizar el análisis y cálculo de red de tierra, ni se toma en cuenta los parámetros de secuencia positiva, negativa y cero del sistema para determinar si la tierra es efectiva o no para las redes de tierra en líneas de transmisión.

1.6 Justificación

Las torres, postes y marcos utilizados en las líneas de transmisión y subtransmisión se instalan en el derecho de servidumbre de carreteras y terrenos privados, por lo que se debe asegurar el cumplimiento del aterrizamiento requerido en la norma establecido en el Acuerdo No 29-E-2000 de SIGET que aplica a líneas de 46kV; para líneas de 115kV y 230kV es necesario acudir a guías, normas internacionales y literatura especializada que muchas veces son difíciles de acceder o que no son bien comprendidas. El diseño, construcción y mantenimiento de las redes de tierra para estas líneas aéreas son importantes para reducir la tasa de falla y brindar un servicio más confiable y seguro, lo cual es altamente demandado en la actualidad. Este tipo de red de tierra tiene diferentes requerimientos que

la cuadrícula de tierra de una subestación y es pertinente un diseño y una solución efectiva en costo para la conexión de tierra de torres y postes. El desarrollo de un manual que recopile tanto criterios técnicos y experiencias de personal especializado en este tipo de red de tierra será una contribución importante en el sector de energía y en la formación de futuros ingenieros electricistas.

1.7 Definiciones

Bajante. Conductor metálico que conecta al hilo de guarda con la red de puesta a tierra

Cable de guarda. Conductor(es) conectado(s) a tierra ubicados por encima de los conductores de fase con el propósito de interceptar y proteger a las fases de impactos directos de rayo.

Contra-antena/Electrodo horizontal de puesta a tierra. Conductor metálico desnudo, enterrado y tendido de forma horizontal, con longitud y profundidad variable, que debe estar conectado a la estructura y sirve para drenar corrientes de descargas atmosféricas o de falla.

Conectores de red de puesta a tierra. Elementos utilizados para unir dos partes metálicas en forma soldable de la red de puesta a tierra, para garantizar el contacto permanente entre ellas.

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

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

Derecho de servidumbre:

Electrodo auxiliar de tierra. Electrodo de tierra con ciertas limitaciones de diseño o funcionamiento. Su función principal puede ser otra que la de conducir la corriente de defecto a tierra.

Electrodo de puesta a tierra. Cuerpo conductor en contacto directo con el suelo y destinado a establecer una conexión con el mismo

Electrodo primario de tierra. Electrodo de tierra específicamente diseñado o adaptado para descargar la corriente de defecto a tierra, a menudo en un patrón de descarga

específico, según lo requiera (o requiera implícitamente) el diseño del sistema de puesta a tierra.

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

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

Diseño de red de tierra para líneas. Proceso técnico mediante el cual se establecen la configuración, disposición geométrica, materiales y parámetros eléctricos de un sistema de puesta a tierra destinado a líneas de transmisión y subtransmisión, con el objetivo de proporcionar un camino efectivo de baja impedancia para la disipación de corrientes de falla a tierra, corrientes inducidas y descargas atmosféricas, garantizando condiciones aceptables de seguridad para las personas, la integridad de las instalaciones y la continuidad operativa del sistema eléctrico.

OPGW. Optical Ground Wire, conductor que combina las funciones de cable de guarda con comunicación por fibra óptica.

Puesta a Tierra. Sistema de electrodos de tierra interconectados con un cierto patrón en un área especificada y enterrado bajo la superficie del suelo.

Relleno. Aportación de un material en contacto directo con los electrodos de puesta a tierra y el suelo circundante. Este relleno puede ser de material producto de la excavación o de banco de préstamo de origen orgánico, cuya función es disminuir la resistividad alrededor de los electrodos para lograr una resistencia baja de puesta a tierra.

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

Resistividad. Es la resistencia eléctrica específica de un material medida en Ω -m. Es la constante de proporcionalidad entre la caída de potencial por unidad de longitud y la densidad de corriente (corriente por unidad de área).

Resistividad aparente. Es la que se obtiene en el trabajo de campo, de acuerdo con un método de medición de resistividad (Wenner) para cada intervalo de medición.

Resistividad recomendada de diseño. Es la resistividad uniforme equivalente que se obtiene mediante la interpretación de resultados de campo con un promedio aritmético del valor máximo y mínimo de las mediciones realizadas o un promedio de todas las mediciones realizadas.

Sistema de potencia. Red de componentes eléctricos instalados para suministrar, transferir y usar energía eléctrica.

Sistema de Subtransmisión. Conjunto de instalaciones eléctricas trifásicas destinadas al transporte de energía eléctrica a niveles de tensión inferiores a los de los sistemas de transmisión y superiores a los de la distribución primaria, cuyo propósito principal es transferir potencia entre sistemas de generación y sistemas de distribución, o entre diferentes áreas del sistema eléctrico, sin suministrar energía directamente al punto final de utilización. Los sistemas de subtransmisión se caracterizan por operar, típicamente, en un rango de tensiones comprendido entre aproximadamente 46 kV y 115 kV, por estar alimentados a través de transformadores interpuestos entre los generadores y la red, y por constituir una etapa intermedia funcional y eléctrica entre la transmisión y la distribución.

1.8 Referencias Normativas

Se toman como referencia las siguientes normas nacionales e internacionales:

- CFE 00J00-52 – 2019 – Red de Puesta a Tierra Para Estructura de Líneas de Transmisión Aéreas de 69kV a 400kV en Construcción
- CFE 00J00-28 - 2019 – Red de Puesta a Tierra Para Estructura de Líneas de Transmisión Aéreas de 69kV a 400kV en Operación
- IEEE Std 80-2013 - IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding
- IEEE Std 81-2012 - IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System
- IEEE Std 142-2007 - IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems (Color Book® series)
- IEEE Std 1243-1997 - IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines
- IEEE Std 998-1996 - IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations
- IEEE Std 1048-2003 - IEEE Guide for Protective Grounding of Power Lines
- 2017 National Electrical Safety Code
- Acuerdo SIGET 29-E-2000 - SIGET

- Normas generales para la construcción de líneas aéreas de distribución de energía eléctrica – SIGET

Capítulo 2 - Líneas de Subtransmisión, Transmisión y Redes de Puesta a Tierra

2.1 Líneas de Subtransmisión y Transmisión

Las líneas de subtransmisión y de transmisión son los elementos fundamentales que funcionan como arterias en los sistemas de potencia. Son las encargadas de transportar la energía eléctrica desde los centros de generación hasta las subestaciones de distribución o maniobra; estando encargadas de la continuidad, confiabilidad y estabilidad del sistema eléctrico de potencia. Las líneas de transmisión tienen voltajes típicos de 115kV en adelante, mientras las líneas de subtransmisión operan entre 69kV y 115kV, dependiendo del territorio. En países con poca extensión territorial, es común ver que estos niveles de voltaje sean menores; como el caso de El Salvador.

Por consecuencia del voltaje de cada línea, existen otras diferencias marcadas entre las líneas de transmisión y las de subtransmisión en general:

- Estructuras: Las líneas de transmisión usualmente usan torres autoportadas de celosía, mientras las líneas de subtransmisión comúnmente usan postes troncocónicos
- Cable de guarda: Las líneas de transmisión usan 1 o 2 cables de guarda que están siempre presentes. En las líneas de subtransmisión en algunos casos está ausente.
- Ángulo de apantallamiento: En líneas de transmisión puede ser negativo o menor a 30°, mientras en las líneas de subtransmisión cuando éste está presente, suelen ser de 30° o incluso mayor
- Longitud de vanos: Las estructuras autoportadas del sistema de transmisión presentan vanos mucho más largos en tamaño comparado a los vanos de las estructuras de subtransmisión, con valores típicos de 500m y 120m, respectivamente.
- Retenidas: Las líneas de subtransmisión al usar postes troncocónicos usualmente poseen retenidas, mientras que las líneas de transmisión al ser estructuras autoportadas raramente las usan.

2.1.1 Niveles de Voltaje

En El Salvador, se pueden distinguir tres grupos de niveles de voltaje:

- Distribución: 13.2kV, 23kV
- Subtransmisión: 46kV
- Transmisión: 115kV, 230kV

2.2 Líneas de Subtransmisión y Estructuras en El Salvador

La subtransmisión en El Salvador opera a 46kV y es mantenida por las diferentes empresas distribuidoras del país. A diferencia del sistema de transmisión, todas las líneas de subtransmisión y distribución son manejadas por empresas privadas. No resulta económico conectar todas las subestaciones de distribución al voltaje principal de alta tensión de transmisión, debido a que ese equipamiento es más grande y costoso. Por lo general, solo las subestaciones más grandes se conectan con este alto voltaje. El voltaje se reduce antes de que la corriente sea enviada a las subestaciones más pequeñas. Los circuitos de subtransmisión suelen disponerse en anillos (bucles) para que la falla de una sola línea no interrumpa el servicio a muchos clientes por más de un breve periodo de tiempo. Los anillos pueden estar normalmente cerrados, donde la pérdida de un circuito no debería resultar en ninguna interrupción, o normalmente abiertos, donde las subestaciones pueden conmutar a un suministro de respaldo. Si bien los circuitos de subtransmisión generalmente se transportan en líneas aéreas, en áreas urbanas puede utilizarse cable subterráneo (soterrado). Las líneas de subtransmisión de menor voltaje requieren menos derecho de vía y estructuras más simples; su instalación subterránea es menos difícil.

No existe una regla general para determinar los niveles de voltaje pertenecientes a cada grupo (distribución, subtransmisión y transmisión), ya que esto es relativo a cada región o país. Por ejemplo, países como Estados Unidos que poseen un territorio amplio, poseen como niveles de voltaje de transmisión los 69kV, 115kV y 138kV; mientras tanto en El Salvador los 69kV y 138kV no son utilizados, y los 115kV se consideran como transmisión debido a la extensión de terreno.

Las líneas de subtransmisión en El Salvador usualmente usan postes troncocónicos de concreto, como se muestra a continuación en una fotografía tomada en las cercanías de la Central Hidroeléctrica 15 de Septiembre:



Figura 2.1 - Tramo de Línea de Subtransmisión a 46kV, Cercanías de Central Hidroeléctrica 15 de Septiembre

Las diversas estructuras y herrajes de las líneas a 46kV se encuentran normadas dentro del Estándar de Construcción de Líneas Aéreas de SIGET.

2.3 Líneas de Transmisión y Estructuras en El Salvador

En El Salvador, operan dos niveles de voltaje para la transmisión en el sistema de potencia: 115kV y 230kV. Las líneas de 230kV interconectan al país con el SIEPAC (Sistema de Interconexión Eléctrica para Países de América Central) con conexiones directas a las líneas de Guatemala y Honduras. Mientras que las líneas de 115kV son la red de transmisión nacional, mantenida por ETESAL. La distribución de las líneas se muestra en la siguiente figura:

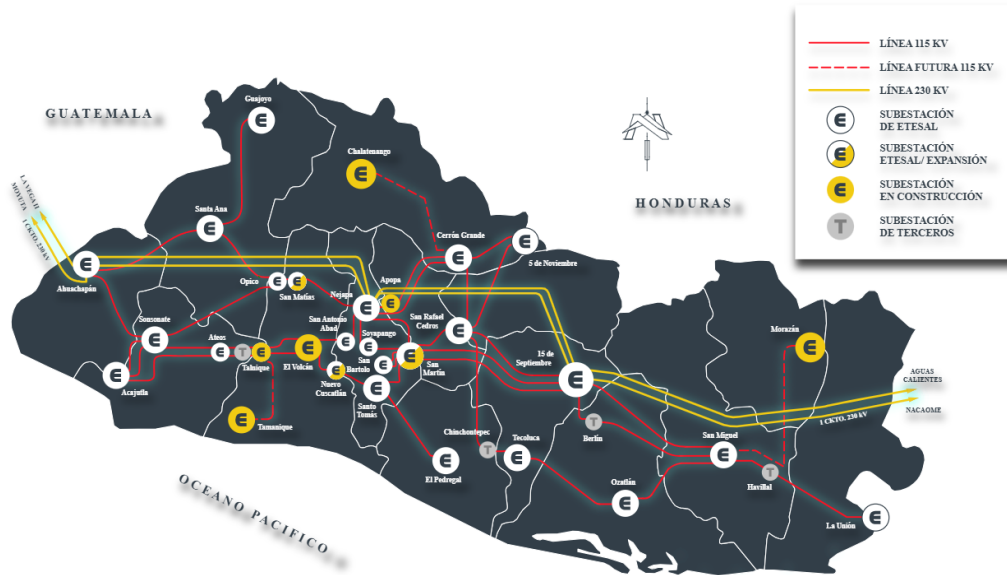


Figura 2.2 - Mapa De Subestaciones y Líneas de Transmisión en El Salvador – Imagen: ETESAL

Las líneas de transmisión ocupan distintas estructuras:

- 115kV: Usan postes troncocónicos de concreto en algunas zonas urbanas, y torres autoportadas de celosía
- 230kV: Exclusivamente torres autoportadas de celosía

La siguiente figura muestra una estructura autoportada de 115kV, ubicada en Santa Tecla:



Figura 2.3 - Ubicación de Estructura Autoportada, 115kV



Figura 2.4 - Estructura Autosoportada del Sistema de Transmisión de El Salvador, 115kV, 2 circuitos. Ubicada en Santa Tecla, La Libertad Sur.

Un tramo de línea de 115kV usando postes tronónicos de concreto en las cercanías de la Subestación San Bartolo de ETESAL:



Figura 2.5 - Ubicación de Tramo de Línea a 115kV Usando Postes Tronónicos



Figura 2.6 - Tramo de Línea a 115kV con Postes Tronconicos. Cercanías de Subestación San Bartolo ETESAL, Ilopango, San Salvador Este

Se muestra una estructura de 230kV, ubicada en la zona de Nejapa:

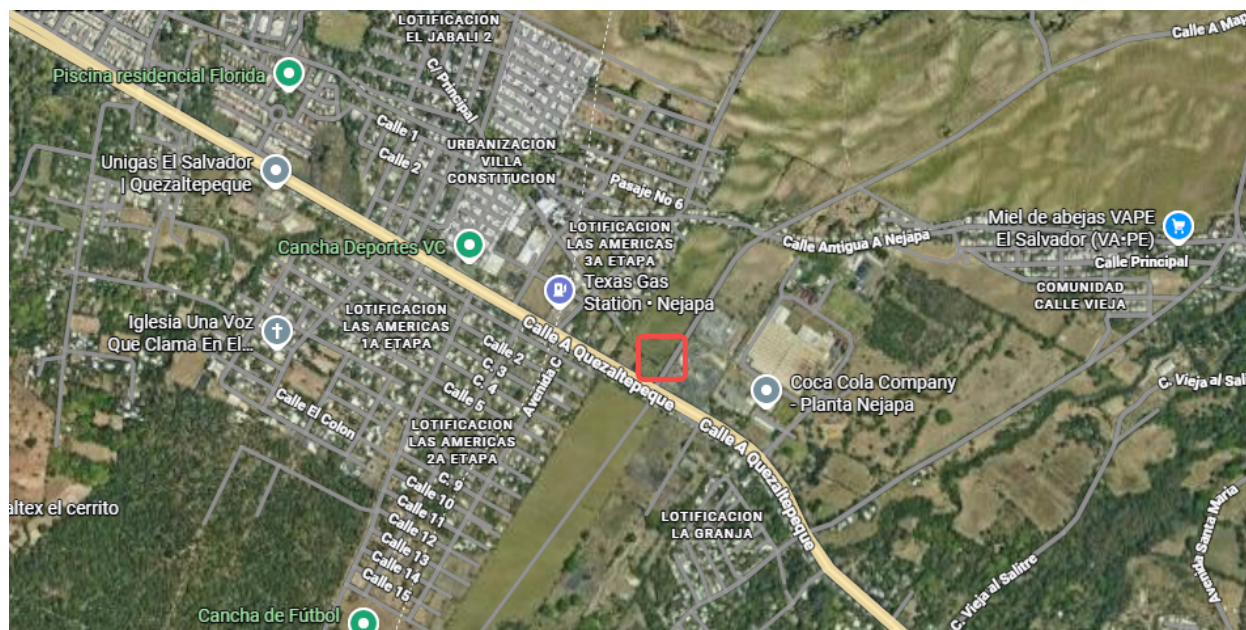


Figura 2.7 - Ubicación Estructura Autosoportada 230kV



Figura 2.8 - Estructura Autosoportada del Sistema de Transmisión de El Salvador, 230kV, 4 circuitos. Ubicada en Nejapa, San Salvador Oeste.

Actualmente, no existe un documento normativo acerca del diseño de las estructuras de 115kV o 230kV en El Salvador.

2.4 Redes de Puesta a Tierra

Las redes de puesta a tierra, o también llamadas sistemas o mallas de tierra son un conjunto de elementos enterrados, como electrodos verticales (varillas de tierra), electrodos horizontales (contra-antenas), puntos de conexión y elementos metálicos adicionales (como fundaciones, tuberías metálicas) interconectados cuya función es proveer un camino de descarga de corrientes eléctricas de falla, sin exceder los límites operacionales del sistema eléctrico que puedan poner en riesgo la continuidad del servicio.

En los sistemas de subtransmisión y de transmisión, un objetivo adicional de las redes de puesta a tierra es minimizar la impedancia transitoria, con el fin de evitar fallas por contoneo inverso, una falla derivada de las descargas atmosféricas. Esto es una diferencia significativa entre las redes construidas para subestaciones, ya que se construyen mallas equipotenciales a fin de disminuir gradientes de potencial. En las estructuras de líneas de subtransmisión/transmisión, se construyen arreglos distribuidos longitudinalmente con el fin de mejorar el desempeño a rayos, debido a la longitud efectiva de los conductores ante el frente de onda del rayo.

En una línea de subtransmisión/transmisión, comúnmente se encuentran 3 elementos conformando las redes de puesta a tierra:

- Fundaciones de estructuras autosoportadas, o de postes troncocónicos
- Electrodo verticales completamente enterrados, usualmente llamados varillas de tierra
- Electrodo horizontales completamente enterrados, usualmente llamados contra-antenas

2.4.1 Resistividad del Suelo

La resistividad del suelo (representada por ρ) es una propiedad intrínseca del mismo que cuantifica la capacidad que presenta el terreno al paso de la corriente eléctrica. Se expresa en ohm-metro ($\Omega\cdot m$) y depende de la composición del suelo como de sus condiciones físicas.

La resistividad no es constante, y puede variar con la profundidad y ubicación del terreno junto a otros factores, entre los cuales:

- Humedad: La resistividad disminuye drásticamente a medida aumenta el contenido de agua en el suelo, por lo que éste es uno de los factores más importantes a tomar en cuenta para las medidas de resistividad, ya que mediciones hechas durante la época lluviosa o con terreno mojado pueden mostrar un terreno con una resistividad mucho menor de lo que realmente es.
- Composición química y salinidad: Una mayor cantidad de sales disueltas en el terreno disminuirá la resistividad; esta es la razón por la cual en terrenos con resistividad alta el tratamiento químico es una opción para mejorar la resistividad.
- Estratificación geológica: Debido a que el suelo no es uniforme, pueden encontrarse capas con diferentes resistividades a medida incrementa la profundidad.

El suelo no es homogéneo, todas las mediciones hechas en superficie no indican la resistividad de un punto en específico, sino un promedio del volumen de tierra por donde se hace circular la corriente de prueba. Al producto de las mediciones se le llama resistividad aparente.

2.4.2 Resistencia de Puesta a Tierra

La resistencia de puesta a tierra es el parámetro que cuantifica la oposición total que ofrece el sistema al paso de la corriente hacia el suelo. En los sistemas de redes de tierra usualmente se prefieren valores bajos de resistencia de tierra, ya que una resistencia baja permitirá una disipación más eficiente de corrientes de falla al suelo. Para los sistemas de subtransmisión/transmisión, una baja resistencia de tierra tiene una relación de proporcionalidad directa con el desempeño a rayos, ya que a medida la resistencia de un arreglo es mayor, la probabilidad de tener fallas derivadas de impactos directos de rayos es mayor. Es posible reducir la magnitud de la resistencia de red de tierra al incrementar la longitud efectiva de los electrodos, localizando las redes de tierra en suelos con menor resistividad o incrementando el área de contacto de los electrodos con el terreno. El aumentar la profundidad de enterramiento de un sistema de puesta a tierra no tiene una relación directa con la disminución del valor de resistencia, ya que si bien es cierto sí puede existir una disminución del valor de la resistencia del arreglo, no es una manera confiable de mejorarlo.

La resistencia de puesta a tierra depende igualmente de múltiples factores, entre los cuales:

- Resistividad del suelo
- Arreglo geométrico de los electrodos
- Número de electrodos y separación, ya sean horizontales o verticales
- Resistencia mutua entre electrodos

Los modelos matemáticos disponibles se basan en el trabajo de Herbert Bristol Dwight y de Erling D. Sunde, y es importante mencionar que ambos se basan en cálculos según la disposición geométrica de los electrodos usados y en un equivalente del suelo modelado a una capa, lo cual en la práctica es muy raro de encontrar, pero para propósitos de cálculo y de análisis son modelos que brindan resultados apropiados para procesos de diseño.

2.5 Modelado de Suelo

El suelo en la realidad es una estructura heterogénea y anisotrópica. Para realizar cálculos de ingeniería en el proceso del diseño de redes de puesta a tierra es imposible modelar todas las variaciones puntuales del suelo, por lo que se usan modelos equivalentes. El

objetivo de realizar el modelado es encontrar una aproximación teórica que produzca una resistividad aparente lo suficientemente representativa de la ubicación que se analiza para poder estimar el comportamiento del terreno ante inyecciones de corriente, evaluando la resistencia de una red de tierra, la distribución de potencial y los gradientes de tensión en la superficie del suelo.

2.5.1 Modelo de Suelo Uniforme

El modelo de suelo uniforme es la aproximación más básica de las características del suelo, asume que el suelo tiene una resistividad constante y con profundidad infinita, es decir, que la resistividad del suelo no varía con la profundidad del mismo.

Es posible modelar suelos como suelo uniforme cuando los datos de medición de resistividad del suelo no muestran variaciones significativas con el espaciamiento de los electrodos de prueba. Debido a la simplicidad de este modelo, es posible usarlo solo cuando al graficar los valores de resistividad se obtiene una curva casi plana.

En la mayoría de los casos reales, el suelo presenta estratificación y variabilidad a medida se aumenta la profundidad.

2.5.2 Modelo de Dos Capas

Este modelo asume que el suelo está formado por dos capas, la superior ρ_1 con una profundidad h y la inferior ρ_2 con profundidad infinita. Es muy usado debido a su simplicidad y capacidad para representar cambios cerca de la superficie, y se expresa como:

$$\rho(z) = \begin{cases} \rho_1, & 0 \leq z < h \\ \rho_2, & z \geq h \end{cases}$$

Para describir el comportamiento de la corriente en la zona de frontera entre las dos capas, se usa el coeficiente de reflexión:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (1)$$

Si $K > 0$, la corriente tiende a quedarse en la capa superior, ya que la resistividad de la capa superior es menor a la de la capa inferior. Si $K < 0$, la corriente penetra hacia la capa inferior debido a la resistividad de la capa inferior siendo menor.

En el escenario que se tenga un suelo de dos capas en el cual la capa superior es de menor longitud a los electrodos de tierra usados, es válido usar la resistividad de la capa inferior para el análisis y diseño del sistema de puesta a tierra.

2.6 Consideraciones de Seguridad

Una asunción común es que cualquier objeto conectado a tierra puede ser tocado de forma segura; sin embargo, una red de puesta a tierra con una baja resistencia no es una garantía completa de seguridad. Los humanos son muy vulnerables a los efectos de la corriente eléctrica a frecuencias de 60Hz, ya que corrientes de aproximadamente 0.1 Amperios a 60Hz pueden ser fatales.

Una magnitud de corriente de 1mA es usualmente reconocida como el límite de percepción, que es donde una persona puede detectar por medio de un cosquilleo el paso de la corriente. En el rango de 9 a 25mA, las corrientes pueden volverse dolorosas, dificultando o imposibilitando soltar objetos energizados que hayan sido tomados con la mano. Para corrientes mayores es posible observar contracciones musculares que dificulten la respiración; estos efectos no son permanentes y desaparecen cuando la corriente es interrumpida, a menos que la contracción sea lo suficientemente severa, deteniendo la respiración por minutos y no segundos. En estos casos, aún se tiene respuesta positiva a la resucitación.

En el rango de 60 a 100mA se alcanza fibrilación ventricular, paro cardíaco o inhibición de la respiración, llevando a lesiones serias o la muerte. Al haber removido la fuente de corriente, se debe brindar reanimación cardiopulmonar, y luego recibir atención médica en un establecimiento de salud [1].

2.6.1 Modelo de Dalziel

Basado en los estudios realizados por Charles Dalziel, se asume que el 99.5% de las personas pueden resistir de forma segura, sin fibrilación ventricular el paso de una corriente con magnitud y duración determinadas por la siguiente fórmula:

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (2)$$

Donde:

k: 0.116 para peso corporal 50kg, o 0.157 para peso corporal de 70kg

t_s : Duración de exposición a la corriente

La ecuación presentada no es válida para duraciones fuera del rango de 0.03s a 3.0s, debido a que es basada en pruebas en ese intervalo de tiempo [1].

2.7 Descargas Atmosféricas

Las descargas atmosféricas, o comúnmente conocidas como rayos son fenómenos físicos de carácter transitorio de alta corriente y alta tensión que se originan debido a la separación y acumulación de cargas dentro de las nubes de tormenta. Este proceso lleva a la creación de un campo eléctrico intenso entre la base de la nube y la tierra, ionizando el aire y generando un canal conductor por medio de la ruptura dieléctrica del aire.

Los rayos pueden ser clasificados en:

- Descargas negativas: Representan más del 90% de las incidencias de los rayos a nivel mundial y son la base para el diseño de las líneas de transmisión y subtransmisión. Se originan desde la base de la nube e inyectan cargas con polaridad negativa.
- Descargas positivas: Representan menos del 5% de las incidencias de los rayos, pero son más peligrosas y destructivas que las descargas negativas, ya que se originan desde la parte superior de las nubes, tienen una duración más larga y generando campos eléctricos más fuertes con máximos de 300kA.

La forma de onda estándar de un rayo se describe comúnmente como una onda de doble exponencial, definida por dos tiempos:

- Tiempo de frente: El tiempo que toma para ir del 10% al 90% del pico. Típicamente este tiempo es de entre 1.2 y 2.0 μ s.
- Tiempo de cola: Tiempo para descender al 50% del valor pico. Usualmente 50 μ s.

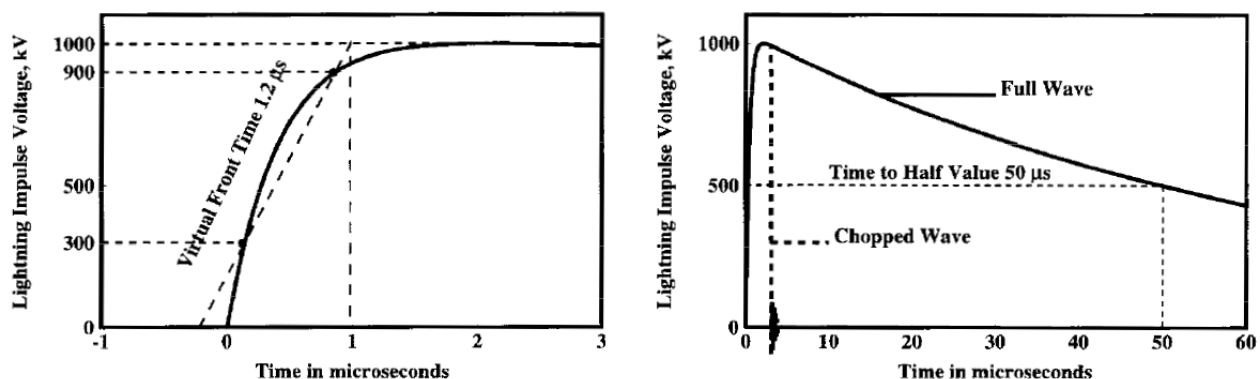


Figura 2.9 - Impulso Estándar de Onda de Rayo

2.7.1 Nivel Isoceraúnico

El nivel isoceraúnico T_d (o también llamado nivel ceraúnico) es un parámetro meteorológico histórico usado para cuantificar la frecuencia anual de tormentas eléctricas en una región geográfica específica. Se define como el número promedio de días de tormenta al año, en los cuales se escucha al menos un trueno en una estación de observación, y se mide en días de tormenta por año.

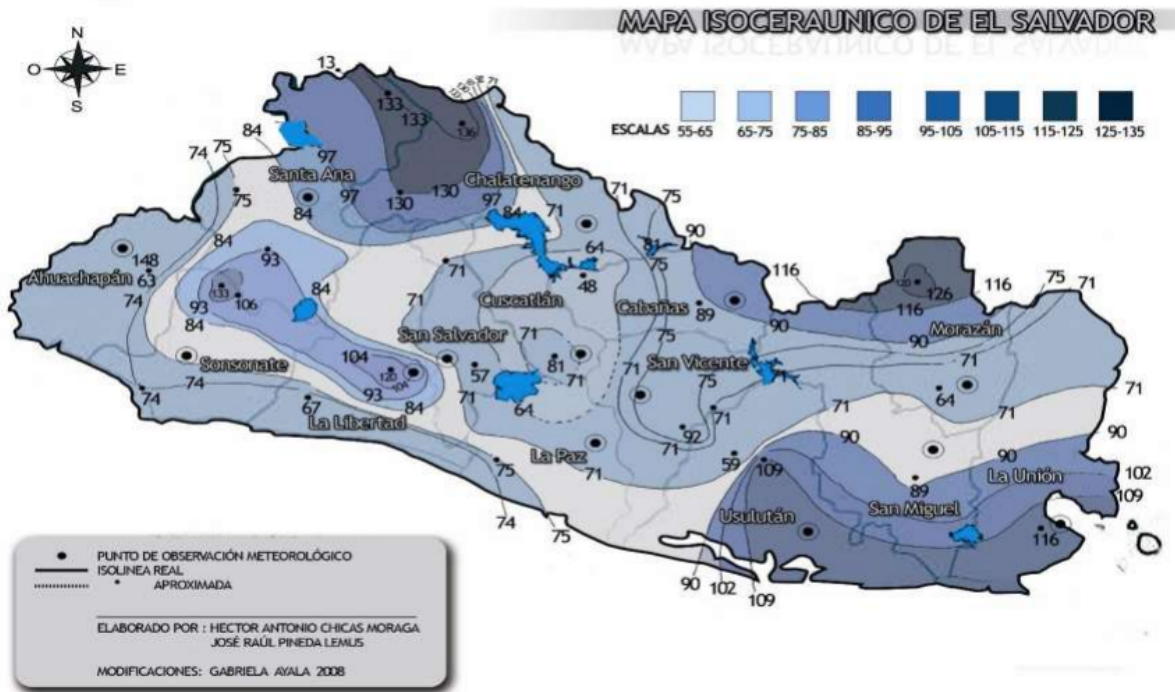


Figura 2.10 - Mapa Isoceraúnico de El Salvador

En base al nivel isoceraúnico, se calcula la densidad de descargas atmosféricas a tierra N_g con:

$$N_g = 0.04T_d^{1.25} \quad (3)$$

La cual sirve para el cálculo de la tasa de descargas en la línea [2]:

$$N_s = N_g \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) \quad (4)$$

Donde:

h = Altura de la estructura [m]

b = Separación entre cables de guarda [m]

2.7.2 Apantallamiento

El apantallamiento de una línea de transmisión o subtransmisión consiste en la instalación de al menos un cable de guarda (comúnmente llamados OPGW por el tipo de conductor usado) en el punto más alto de las estructuras de las líneas, por encima de los conductores de fase. Su propósito es reducir la probabilidad al mínimo posible de un impacto directo a los conductores de fase, lo cual podría resultar en fallas del sistema eléctrico. Estos elementos funcionan un papel esencial en la confiabilidad del sistema eléctrico ya que interceptan las descargas atmosféricas.

Los cables de guarda, al ubicarse en el punto más alto de las estructuras representan una trayectoria preferencial para las descargas atmosféricas debido a su menor impedancia hacia tierra, al ser comparados con los conductores de fase.

Una tarea importante del diseñador de líneas es ubicar correctamente los cables de guarda, ya que una geometría adecuada reducirá la probabilidad de que las descargas atmosféricas tengan impactos directos a los conductores de fase. Una ubicación adecuada de los cables de guarda es usualmente definida por el ángulo de apantallamiento [2], como se muestra en la Figura 2.2. El ángulo de apantallamiento es el ángulo formado entre la línea vertical que pasa por cable de guarda y la línea recta que conecta el cable de guarda con el conductor de fase más expuesto.

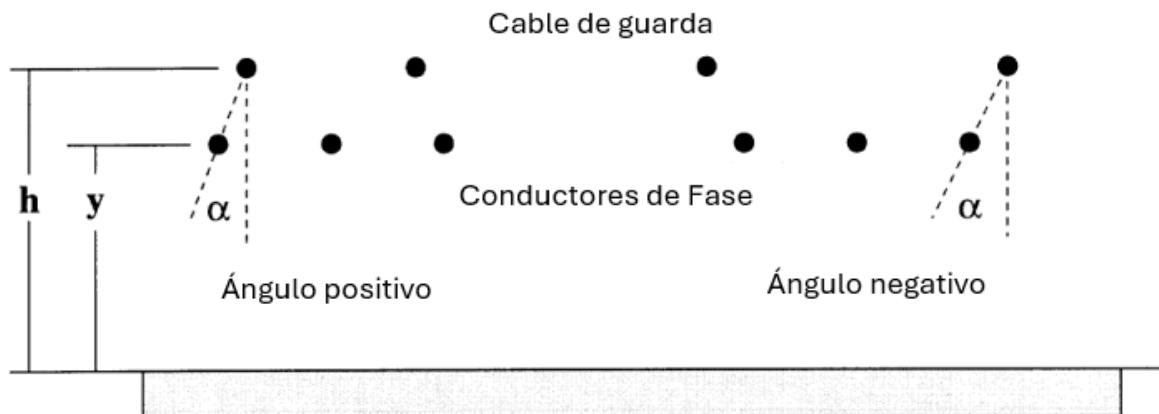


Figura 2.11 - Definición de Ángulo de Apantallamiento

Históricamente, se ha considerado que un ángulo de 30° proporciona una protección adecuada para líneas de entre 115kV-230kV. Sin embargo, para voltajes mayores la altura de las estructuras aumenta y por consecuencia, se tiene un peor desempeño a rayos con el mismo ángulo, por lo que se tiene la conclusión que a medida la altura de las estructuras aumenta, el ángulo de apantallamiento se reduce [2].

2.7.3 Programa Flash 2.0 – IEEE

Para el análisis del desempeño a rayos de las líneas de transmisión, se tienen tres categorías de modelos usados:

- Métodos que modelan directamente los fenómenos de ruptura, tales como el modelo de progresión del líder.
- Métodos derivados del modelo de progresión del líder, tales como el modelo de índice disruptivo.
- Métodos que utilizan directamente la curva estándar volt-tiempo o de retardo de tiempo durante el período anterior a que la forma de onda se vuelva no estándar.

Los tres modelos son actualmente usados, pero ninguno es universalmente aceptado. CIGRE ha seleccionado un método simple de progresión del líder, mientras que el modelo de índice disruptivo ha demostrado ser insatisfactorio para describir una curva voltaje-tiempo para una onda de impulso estándar, con errores típicos sobrepasando el 5%.

IEEE Flash 2.0 fue creado y diseñado con el propósito de simplificar el proceso de análisis de desempeño a rayos, usando el método de curva estándar volt-tiempo [2]. Este programa permite:

- Estimar la frecuencia anual de interrupciones debidas a descargas atmosféricas, por medio de dos indicadores:
 - Shielding Failure Flashover Rate, o tasa de fallas por apantallamiento. Se produce cuando el rayo golpea directamente la fase.
 - Backflash Flashover Rate, o tasa de falla por flameo.
- Evaluar el desempeño del apantallamiento
- Analizar el efecto de parámetros de la estructura (como altura, cable de guarda usado, longitud de vanos, resistencia a tierra) en la incidencia de fallas

2.8 CYMGRD

CYMGRD es un software especializado desarrollado por Eaton/Cooper Power Systems para el análisis de redes de puesta a tierra en subestaciones que ha sido diseñado para ayudar a optimizar el diseño de nuevas mallas y analizar las existentes, de cualquier geometría.

CYMGRD permite analizar diversas configuraciones de electrodos tanto en arreglos simétricos y no simétricos al permitir el uso de varillas de tierra y contra-antenas/contrapesos mediante el análisis de elementos finitos al discretizar los elementos en segmentos. Realiza cálculos de potencial eléctrico en la superficie del terreno, corrientes distribuidas a lo largo de la red de tierra, potenciales de paso y de contacto y el

cálculo de la resistencia e impedancia de la red de tierra, partiendo de análisis de suelo de una o dos capas, ya sean obtenidos con mediciones de campo o con valores definidos por el usuario.

El programa funciona conforme a las normas IEEE Std 80-2000, IEEE Std 81-1983 y IEEE Std 837-2002 [3].

2.8.1 Análisis por Elementos Finitos

El análisis por elementos finitos es un método numérico avanzado utilizado para encontrar soluciones aproximadas a problemas complejos, descritos por ecuaciones diferenciales parciales.

CYMGRD utiliza este método para realizar el análisis de las redes de tierra. Los estándares convencionales (como las fórmulas simplificadas encontradas en IEEE Std 80 y CFE 00J0052) asumen condiciones altamente idealizadas: un suelo con una resistividad completamente uniforme o, en el mejor de los casos, un modelo de dos capas perfectamente horizontales. Además, presuponen mallas de tierra simétricas y una inyección de corriente uniforme. Su aplicación se estructura en cuatro etapas algorítmicas fundamentales:

- Discretización Espacial (Generación de Malla): El dominio continuo de estudio (es decir, el volumen de suelo estratificado y la geometría tridimensional de la red de electrodos) se subdivide en un número finito de subdominios geométricos elementales, típicamente tetraedros o hexaedros.
- Definición de las Ecuaciones Gobernantes: El comportamiento del flujo de corriente a través del medio disipativo en estado estacionario está regido por la ley de conservación de la carga acoplada a la forma macroscópica de la ley de Ohm. Para un medio conductivo lineal e isótropo, la distribución espacial del potencial eléctrico escalar V se describe matemáticamente mediante la ecuación de Poisson:

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla V \right) = -J$$

donde ρ representa la resistividad eléctrica del material (un parámetro que puede definirse de forma discreta para cada elemento de la malla) y J denota la densidad de corriente volumétrica inyectada al sistema durante una condición de falla.

- Establecimiento de las Condiciones de Contorno: Para garantizar la unicidad de la solución analítica de la EDP, es imperativo establecer restricciones físicas en las fronteras del dominio computacional. Comúnmente, se aproxima el límite geológico asumiendo una condición de contorno de Dirichlet homogénea en el infinito (donde V tiende a 0 a medida que la distancia radial se aleja de la zona de falla), mientras que la inyección de la corriente de cortocircuito en los conductores enterrados se modela mediante condiciones de Neumann.
- Ensamblaje y Resolución del Sistema Matricial: Las ecuaciones formuladas para cada subdominio se integran para conformar un sistema global de ecuaciones algebraicas lineales, expresado típicamente de la forma $K \cdot V = I$. En este sistema, K corresponde a la matriz de conductancia global (simétrica y dispersa), V es el vector de potenciales nodales incógnitos e I representa el vector de excitación de corrientes. La inversión numérica de esta matriz arroja la distribución exacta del potencial en cada nodo del dominio analizado, permitiendo determinar con precisión las tensiones de paso y contacto en la superficie.

2.9 Sondeo Eléctrico Vertical

El Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) se establece como la técnica geofísica de exploración unidimensional (1D) por excelencia. A diferencia de los métodos de perfilaje estático, el SEV permite cuantificar la variación de la resistividad eléctrica en función de la profundidad, proporcionando los parámetros físicos necesarios para modelar sistemas de tierras de múltiples capas.

El principio operativo del SEV radica en la inyección de una corriente eléctrica continua o de muy baja frecuencia, denotada como I , hacia el subsuelo a través de dos electrodos de inyección externos (A y B). Simultáneamente, se mide la diferencia de potencial, ΔV , inducida entre dos electrodos de medición internos (M y N). A medida que la distancia de separación entre los electrodos A y B se incrementa de manera simétrica respecto a un eje central fijo, el campo eléctrico penetra estratos más profundos.

La resistividad aparente del terreno ρ_a , para cada iteración espacial se determina aplicando la ley de Ohm adaptada a un semiespacio conductor, la cual es ponderada por un factor geométrico K :

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

El parámetro K es una constante espacial que depende exclusivamente de la configuración geométrica y la separación instantánea de los cuatro electrodos en la superficie del terreno.

Para la ejecución del SEV, la configuración de Schlumberger presenta ventajas metodológicas sustanciales frente al método de Wenner. Al mantener los electrodos de potencial (M y N) relativamente fijos y cercanos al centro del arreglo, variando primordialmente la apertura de los electrodos de corriente (A y B), se mitigan de forma significativa las distorsiones causadas por heterogeneidades geológicas locales y variaciones superficiales en la resistencia de contacto. Adicionalmente, esta configuración optimiza la logística del levantamiento de campo al reducir la movilización iterativa del cableado de instrumentación.

Capítulo 3 - Propuesta de Manual de Diseño

3.1 Objetivo

El objetivo de este manual es presentar una guía técnica para el diseño de redes de puesta a tierra para líneas aéreas de transmisión y subtransmisión que establezca valores requeridos de resistencia de tierra, criterios de diseño, método de cálculo, configuraciones, mantenimiento y técnicas de mejora de la red de tierra para un adecuado desempeño al impacto de descargas atmosféricas y el paso de corriente de cortocircuito durante las fallas, teniendo la seguridad como un eje principal.

3.2 Campo de Aplicación

Para los sistemas de puesta a tierra de líneas de subtransmisión aéreas de 46 kV, y las líneas de transmisión aérea de 115kV y 230 kV en El Salvador.

3.3 Características y Criterios Generales

En el proceso de diseño de redes de puesta a tierra tanto para líneas aéreas de transmisión y líneas aéreas de subtransmisión se tendrán elementos comunes, entre los cuales se encuentran:

- Especificación y distinción de nivel de voltaje, es decir, si la línea será de subtransmisión o de transmisión
- Especificación de las estructuras que formarán parte de la línea, siendo postes de concreto auto soportados o torres de celosía
- Reporte de mediciones de resistividad aparente del suelo
- Distinción del tipo de terreno; entre rocoso o si el terreno se dedica o no a la actividad agrícola
- Especificación de materiales a usar como parte del arreglo
- Detalle del arreglo a usar en función de características de la línea
- Reporte de mediciones de resistencia de red de puesta a tierra

Entre los aspectos anteriores se mencionan varios criterios para el diseño y construcción de la red de puesta a tierra de una línea de transmisión, entre los cuales se distinguirán por su especial relevancia tres de ellos:

- Tipo de estructura: postes o torre de transmisión
- Resistividad de diseño del suelo
- Tipo de terreno: rocoso, cultivable o no cultivable

En base al tipo o uso del terreno, los electrodos horizontales (de ahora en adelante, llamados contra-antenas) se deben instalar en zanjas de 0.3 m de ancho, con las profundidades indicadas:

Tipo de Suelo	Profundidad (m)
Rocoso	0.4
No Cultivable	0.8
Cultivable	1.5

Tabla 3.1- Profundidad de Contra-Antenas En Función del Suelo

Nota: El cambio en profundidad del arreglo no representa diferencias significativas en los valores de la resistencia del arreglo de red de tierra, los cambios en profundidad tienen como propósito la protección y manutención de integridad de los elementos de la puesta a tierra, no un método confiable de reducción del valor final de resistencia.

Dependiendo de si la línea está conformada por postes o torres de transmisión, se tendrán distintos valores de resistencia requeridos para la aceptación del diseño:

Tipo de Estructura	Intervalo de Resistividad del Suelo (Ω -m)	Criterio de aceptación
Torres Auto Soportadas	1 – 1000	Resistencia de red de tierra menor a 10Ω
	750 en adelante	Construcción de arreglo presentado
Postes Troncónicos	1 – 750	Resistencia de red de tierra menor a 20Ω
	750 en adelante	Construcción de arreglo presentado

Tabla 3.2 - Criterios de Aceptación para Arreglos de Puesta a Tierra Según Tipo de Estructura

Finalmente, dependiendo del tipo de estructura se proponen distintos arreglos; los cuales a mayor resistividad del suelo se requiere una mayor cantidad de elementos, incrementando la longitud de las contra-antenas y la cantidad de electrodos a usar. Así mismo, todos los elementos que conforman el arreglo de la red de puesta a tierra deben ser colocados dentro del derecho de servidumbre de la línea, la cual se ejerce sobre una porción de terreno que tiene un ancho máximo de 38 metros [4].

Para torres autosoportadas (usados para líneas de transmisión a 115kV o 230kV):

Intervalo de resistividad de diseño (Ω -m)	Longitud de Contra-Antena (m)	Número de electrodos verticales por contra-antena	Código Referencia de Arreglo	Figura
1 – 100	6	2	AS1	3.1
101 – 300	12	3	AS2	3.2
301 – 500	18	4	AS3	3.3
500 – 750	30	6	AS4	3.4
751+	36	7	AS5	3.5

Tabla 3.3 - Longitud y Cantidad de Elementos de Contra-Antenas para Torres Autosoportadas

Para líneas conformadas por postes troncónicos (usados para líneas de subtransmisión a 46kV o líneas de transmisión a 115kV):

Intervalo de resistividad de diseño (Ω -m)	Longitud de Contra-Antena (m)	Número de electrodos verticales por contra-antena	Código Referencia de Arreglo	Figura
1 – 300	6	3	PT1	3.6
301 – 500	12	5	PT2	3.7
501+	18	7	PT3	3.8

Tabla 3.4 - Longitud y Cantidad de Elementos de Contra-Antenas para Postes Troncónicos

Las especificaciones de los materiales y tipos de conexiones entre los elementos no variarán entre los tipos de arreglos y/o estructuras, y se detallan a continuación:

Conductor horizontal para contra-antenas	Cable de cobre desnudo, temple semiduro. Sección transversal de 33.62 mm ² , AWG #2
	Cable copperweld, Sección transversal de 36.83mm ² , calibre #2
	Cable de acero galvanizado de alta resistencia. Sección transversal de 51.14 mm ² ,
Electrodos de tierra	Varilla con alma de acero y recubrimiento electrolítico de cobre, espesor mínimo del recubrimiento de 0.254 mm, 3 m de longitud y 15.86 mm de diámetro
Conexiones soldables	Conexiones soldables de tipo exotérmica

Tabla 3.5 - Especificaciones de Materiales para Arreglos de Red de Puesta a Tierra

Notas:

- Las especificaciones mencionadas en la Tabla 3.5 son especificaciones mínimas, por ejemplo, es posible seleccionar conductores de tierra con secciones transversales mayores a las listadas.
- No se aceptan el uso de conductores mecánicos para las conexiones entre contra-antenas, varillas y bajantes.

Como se detalla en la Tabla 3.3, para estructuras autosoportadas se reconocen 5 posibles arreglos y para postes tronónicos 3, en función de la resistividad del suelo. Previo a la selección del arreglo, mediciones en campo deben haberse realizado para determinar la resistividad de diseño.

Estos arreglos deben seguir las especificaciones de materiales listadas en la Tabla 3.5, y deben ir colocados a las profundidades especificadas en la Tabla 3.1. Así mismo, se debe de guardar al menos 1 metro de distancia entre el elemento más exterior de los arreglos y el límite de la servidumbre de la línea.

Para propósitos de diseño y análisis del suelo y los arreglos propuestos previos a su construcción, se supone un modelo de suelo con resistividad uniforme tomada en base a la resistividad de diseño recomendada, dada por el promedio simple de las mediciones de resistividad:

$$\rho_d = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \rho_i \quad (5)$$

Donde:

ρ_d : Resistividad de diseño

ρ_i : Mediciones de resistividad

n: Número de mediciones realizadas

Igualmente, es válido tomar las lecturas con mayor y menor magnitud, y obtener su promedio:

$$\rho = \frac{\rho_{max} + \rho_{min}}{2} \quad (6)$$

Donde:

ρ = Resistividad recomendada de diseño [Ω -m]

ρ_{max} = Resistividad máxima medida [Ω -m]

ρ_{min} = Resistividad mínima medida [Ω -m]

Para la medición de resistividad del suelo se aborda en el Anexo A el Método de Wenner, para el cual su practicidad resalta. Existen otros métodos que pueden ser utilizados para realizar mediciones en campo (como el método de Schlumberger), sin embargo, el Método de Wenner producirá buenos resultados en la gran mayoría de situaciones.

3.4 Arreglos para Torres Autosoportadas

Todos los arreglos presentados siguen un criterio de separación entre varillas de puesta a tierra de 2 veces la longitud de la varilla, por lo tanto, la separación entre las varillas de las contra-antenas es de 6 metros, mientras se tiene una separación de 0.70 metros entre cada elemento de la fundación de la torre y la primera varilla. Cada elemento de contra-antena de 6 metros es llamado etapa y a medida la resistividad de diseño aumenta, se van añadiendo más etapas.

En las siguientes figuras se detallan los arreglos propuestos para los distintos rangos de resistividad de diseño, modelando una torre auto soportada con dimensiones de 5 metros en su base y 5 metros de ancho, sin embargo, los arreglos pueden ser aplicados a torres de cualquier dimensión sin la necesidad de realizar ajustes. Se detallan las longitudes de las etapas de contra-antenas, que dan lugar a la separación entre varillas.

El arreglo de puesta a tierra está conectado a la torre en cada pata de la misma, y esta conexión puede ser realizada desde el exterior de la estructura o embebida en la fundación de cada pata. Sin embargo, para evitar daños por vandalismo se sugiere realizar una conexión embebida.

Caso 1. Arreglo AS1. Red de puesta a tierra para terrenos con resistividad de diseño entre 1 y 100 Ω -m.

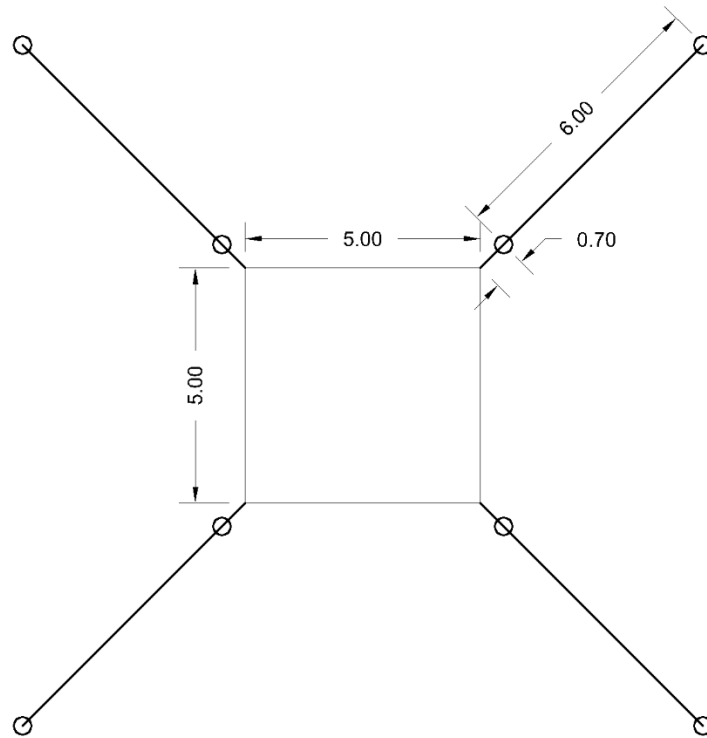


Figura 3.1 - Arreglo AS1. Red de Puesta a Tierra para Estructura Auto Soportada de Línea de Transmisión con Suelo con Resistividad de Diseño Entre 1 y 100 Ω -m

Caso 2. Arreglo AS2. Red de puesta a tierra para terrenos con resistividad de diseño entre 101 y 300 Ω-m.

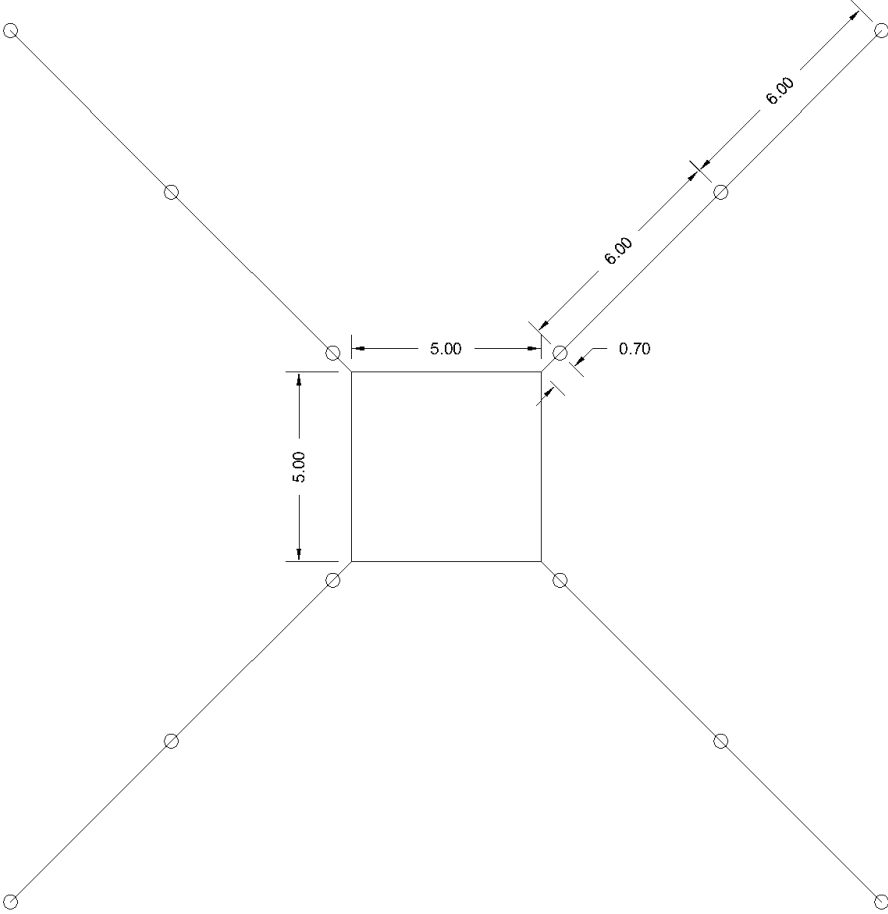


Figura 3.2 - Arreglo AS2. Red de Puesta a Tierra para Estructura Auto Soportada de Línea de Transmisión con Suelo con Resistividad de Diseño Entre 101 y 300 Ω-m

Caso 3. Arreglo AS3. Red de puesta a tierra para terrenos con resistividad de diseño entre 301 y 500 Ω -m.

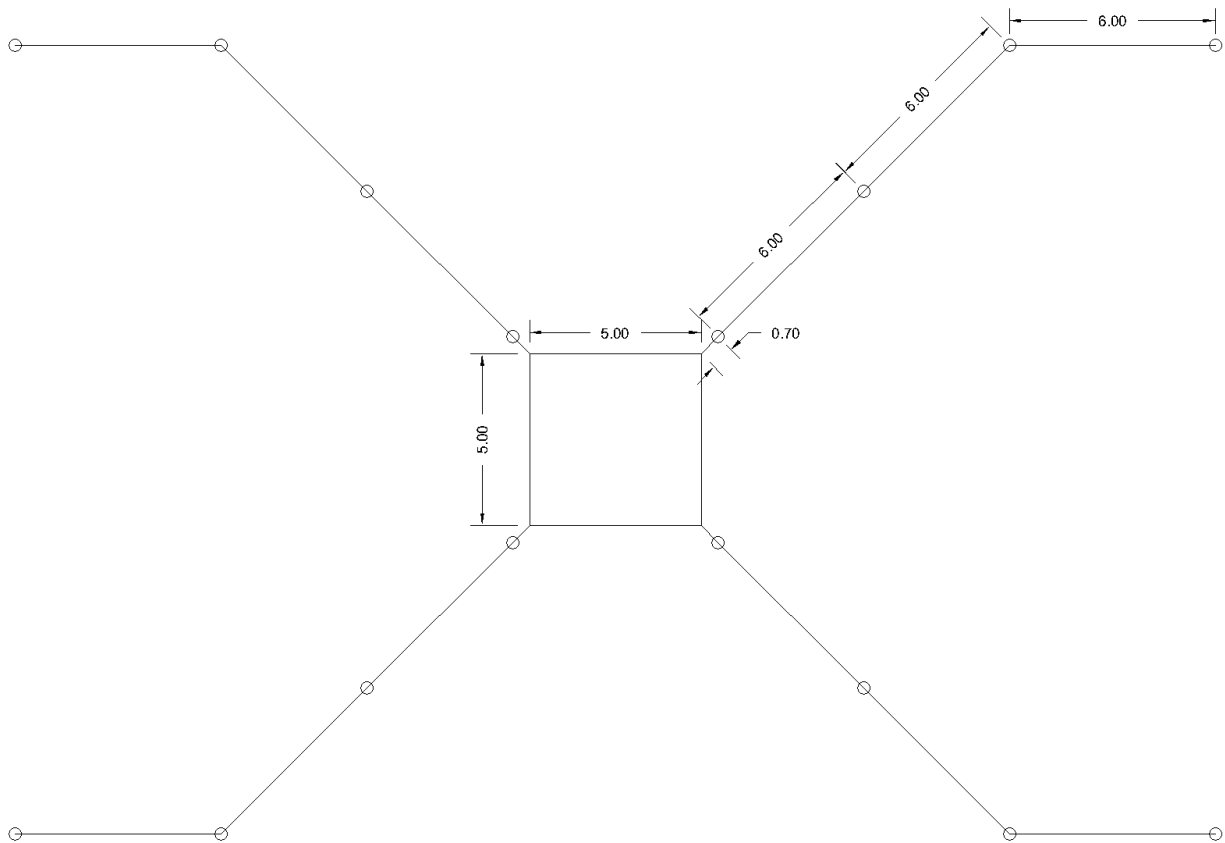


Figura 3.3 - Arreglo AS3. Red de Puesta a Tierra para Estructura Auto Soportada de Línea de Transmisión con Suelo con Resistividad de Diseño Entre 301 y 500 Ω -m

Caso 4. Arreglo AS4. Red de puesta a tierra para terrenos con resistividad de diseño entre 501 y 750 Ω -m.

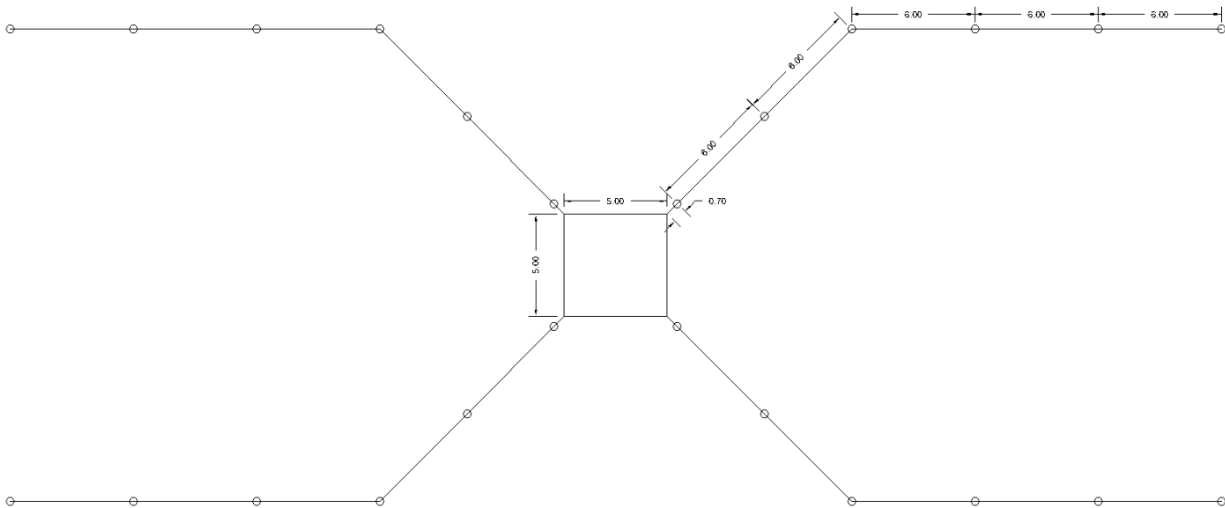


Figura 3.4 - Arreglo AS4. Red de Puesta a Tierra para Estructura Auto Soportada de Línea de Transmisión con Suelo con Resistividad de Diseño Entre 501 y 750 Ω -m

Caso 5. Arreglo AS5. Red de puesta a tierra para terrenos con resistividad de diseño de 750 Ω -m en adelante.

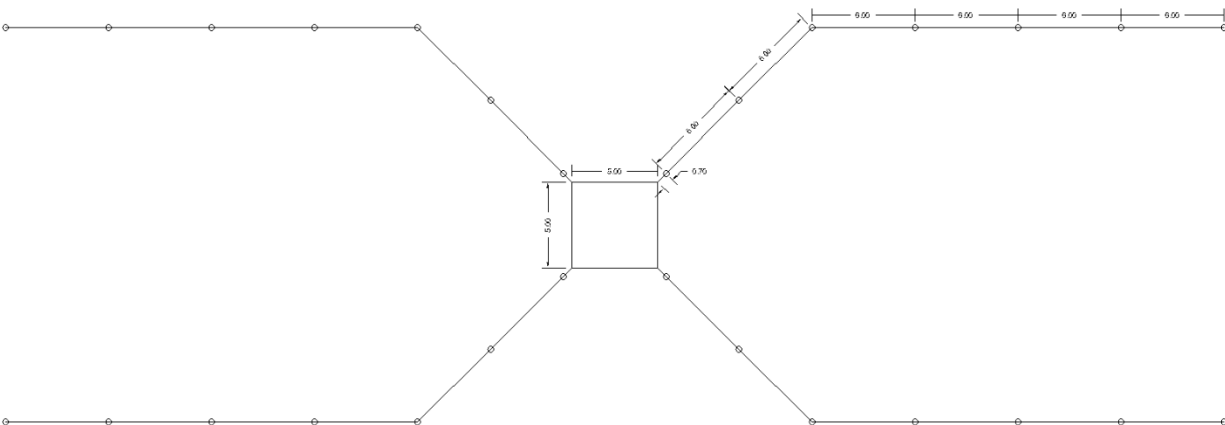


Figura 3.5 - Arreglo AS5. Red de Puesta a Tierra para Estructura Auto Soportada de Línea de Transmisión con Suelo con Resistividad de Diseño de 750 Ω -m en Adelante

Caso 2. Arreglo PT2. Red de puesta a tierra para terrenos con resistividad de diseño entre 301 y 500 Ω -m.

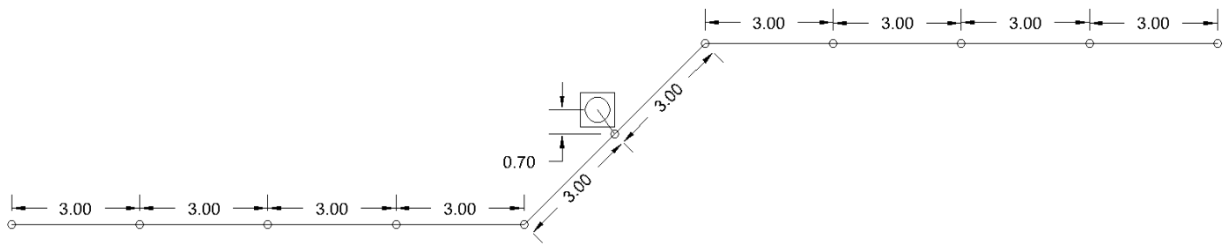


Figura 3.7 - Arreglo PT2. Red de Puesta a Tierra para Poste Troncoónico de Línea de Transmisión con Suelo con Resistividad de Diseño Entre 301 y 500 Ω -m

Caso 3. Arreglo PT3. Red de puesta a tierra para terrenos con resistividad de diseño de 501 Ω -m en adelante

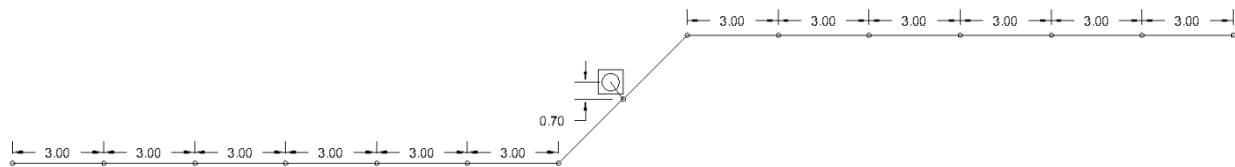


Figura 3.8 - Arreglo PT3. Red de Puesta a Tierra para Poste Troncoónico de Línea de Transmisión con Suelo con Resistividad de Diseño de 501 Ω -m en Adelante

3.6 Proceso de Diseño

El diseño e instalación de las redes de puesta a tierra para líneas de subtransmisión y transmisión debe efectuarse según lo indicado a continuación [5]:

- Medición de resistividad del suelo en cada punto donde una estructura se vaya a localizar, ya sea un poste o una torre auto soportada. Estas mediciones se sugieren realizarse con el método de Wenner, descrito en el Anexo A de este manual.
- Determinar la resistividad de diseño
- En base a la resistividad de diseño, se debe seleccionar un arreglo de la Tabla 3.3 si se trata de torres autosoportadas o de la Tabla 3.4 en caso de ser un poste troncoónico. Esto con el fin de cumplir con el criterio de aceptación correspondiente, descritos en la Tabla 3.2.

- d. Elaborar lista y especificaciones de materiales a usar, basados en el paso anterior.
- e. Previo a la instalación de la puesta de tierra, se requiere validar la ingeniería de detalle para cada una de las estructuras que componen la línea de transmisión. La red de puesta a tierra puede ser instalada solo cuando ésta haya sido previamente validada con una memoria de cálculo usando los modelos sugeridos.
- f. Al terminar la instalación de la red de tierra, se procede a la medición de la resistencia de la red de tierra en base a los métodos presentados en el Anexo B de este manual, para validar el criterio de aceptación en base a la resistividad de diseño del suelo.
 - a. En caso la resistencia de la red de tierra no tuviera el valor del criterio de aceptación, se podría hacer relleno con un material de resistividad menor, para poder alcanzar una resistencia de red de tierra menor. El agregar varillas a las etapas ya existentes podría ser también válido, sin embargo, esto podría no representar una disminución considerable.
- g. Elaboración de reporte final, el cual incluirá las mediciones de resistividad del suelo y resistencia de red de tierra, junto al tipo de arreglo usado detallando la longitud y cantidad de electrodos verticales y contra-antenas usadas.

Las mediciones para la resistencia de red de tierra de las torres autosoportadas deben hacerse en todas las estructuras, considerando su centro como el punto base en el sentido de la transmisión representados en la siguiente figura; en caso de no poder realizar la medición en ese sentido, se puede realizar en cualquier otro sentido considerando el centro de la estructura como base y debe indicarse en el formato de reporte presentado en los anexos de este manual.

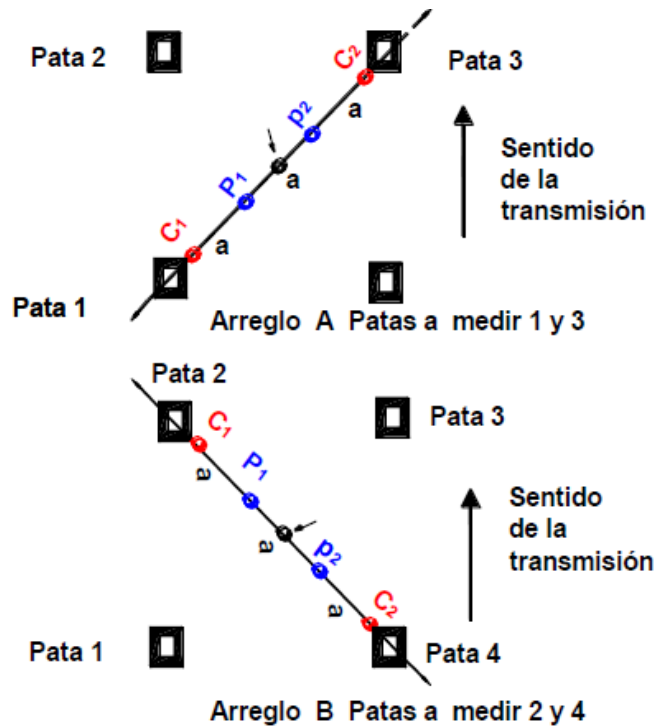


Figura 3.9 - Direcciones Preferentes para Medición de Resistencia de Red de Tierra para Torres Auto Soportadas

De la misma manera para los postes tronónicos, la medición debe de realizarse en el sentido de la transmisión y paralelo al arreglo de la red de puesta a tierra, como se muestra en la siguiente figura

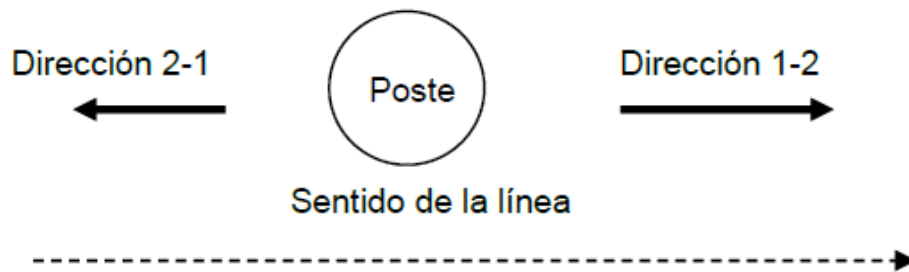


Figura 3.10 - Direcciones Preferentes para Medición de Resistencia de Red de Tierra para Postes Tronónicos

3.7 Principales Consideraciones de Diseño

Un sistema de puesta a tierra debe instalarse de manera que limite el efecto de los gradientes de potencial de tierra a niveles de tensión y corriente que no pongan en peligro la seguridad de las personas o los equipos en condiciones normales y de falla. El sistema

también debe contribuir a la confiabilidad de la línea de subtransmisión/transmisión garantizando la continuidad del servicio o al menos una baja tasa de fallas [1].

Todos los arreglos presentados en este manual son combinaciones de conductores horizontales (contra-antenas) y electrodos verticales (varillas) enterrados bajo tierra. Este concepto es usualmente el predominante en los sistemas de puesta a tierra. Algunas de las razones para utilizar el sistema combinado de varillas y contra-antenas son:

- Debido a que los criterios de aceptación están basados en valores bajos de resistencia de la red de tierra, el uso de solo contra-antenas o varillas resulta insuficiente para lograr los valores requeridos, sin recurrir a grandes extensiones de conductor o un gran número de varillas usadas
- Si la magnitud de corriente que se disipa es alta, es poco probable poder instalar contra-antenas que tengan una resistencia lo suficientemente baja para poder asegurar que el incremento del potencial de tierra no generará gradientes de superficie peligrosos para el contacto humano. La instalación de varillas de tierra estabilizará el desempeño del sistema combinado, ya que las variaciones de humedad en las capas superiores del suelo incrementarán la resistividad, mientras que la resistividad de las capas inferiores se mantendrá usualmente constante.

Usualmente los sistemas de puesta a tierra se conforman de electrodos primarios y electrodos secundarios, sin embargo, debido a la naturaleza constructiva de las líneas de subtransmisión y transmisión en El Salvador, se consideran solo electrodos primarios ya que será el caso más común por encontrar. Sin embargo, en el caso de tener acceso a electrodos secundarios, se recomienda realizar las conexiones del sistema de puesta a tierra para mejorar el desempeño y la reducción de resistencia de la red.

3.8 Características del Suelo

El comportamiento de un electrodo de tierra enterrado en el suelo puede analizarse mediante el circuito de la figura siguiente. Como se muestra, la mayoría de los suelos se comportan a la vez como un conductor de resistencia R , y como un dieléctrico. Excepto en las ondas de alta frecuencia y frente pronunciado que penetran en un material de suelo muy resistivo, la corriente de carga es despreciable comparable con la de fuga, y la tierra puede representarse como una resistencia pura.

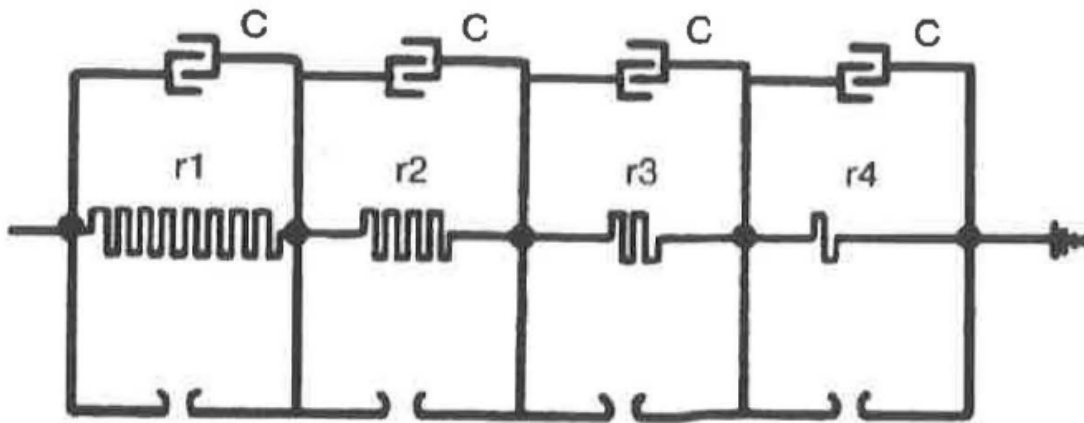


Figura 3.11 - Modelo de Circuito de Suelo

La resistividad del suelo no suele verse afectada por un gradiente de tensión a menos que éste supere un determinado valor crítico. Este valor varía según el material del suelo, pero suele ser de varios kilovoltios por centímetro. Una vez superado, los arcos se desarrollarían en la superficie del electrodo y progresarían hacia el interior de la tierra para aumentar el tamaño efectivo del electrodo, hasta que los gradientes se reduzcan a valores que el material del suelo pueda soportar. Como los sistemas de puesta a tierra cuando se consideran los criterios de seguridad para potenciales de paso y de toque suelen diseñarse para cumplir los límites de tensión de paso y contacto, se puede suponer que el gradiente siempre está por debajo del rango crítico.

La resistividad del suelo en las proximidades de los electrodos de tierra puede verse afectada por la corriente que fluye desde los electrodos hacia el suelo circundante. Las características térmicas y el contenido de humedad del suelo determinarán si una corriente de una magnitud y duración dadas provocará un secado significativo y, por tanto, aumentará la resistividad efectiva del suelo. Un valor conservador de la densidad de corriente es no superar los 200 A/m^2 durante 1 segundo.

La conducción eléctrica en los suelos es esencialmente electrolítica. Por este motivo, la resistividad de la mayoría de los suelos aumenta bruscamente cuando el contenido de humedad es inferior al 15% del peso del suelo. La cantidad de humedad depende además de la granulometría, la compacidad y la variabilidad de los tamaños de grano. Sin embargo, como se muestra en la curva 2 de la Figura 3.12, la resistividad se ve poco afectada una vez que el contenido de humedad supera aproximadamente el 22%, como se muestra en IEEE Std 142™.

El efecto de la temperatura sobre la resistividad del suelo es casi despreciable para temperaturas superiores al punto de congelación. A 0°C, el agua del suelo comienza a congelarse y la resistividad aumenta rápidamente. La figura 3.12 muestra esta variación típica para un suelo franco arenoso que contiene un 15,2% de humedad en peso [1].

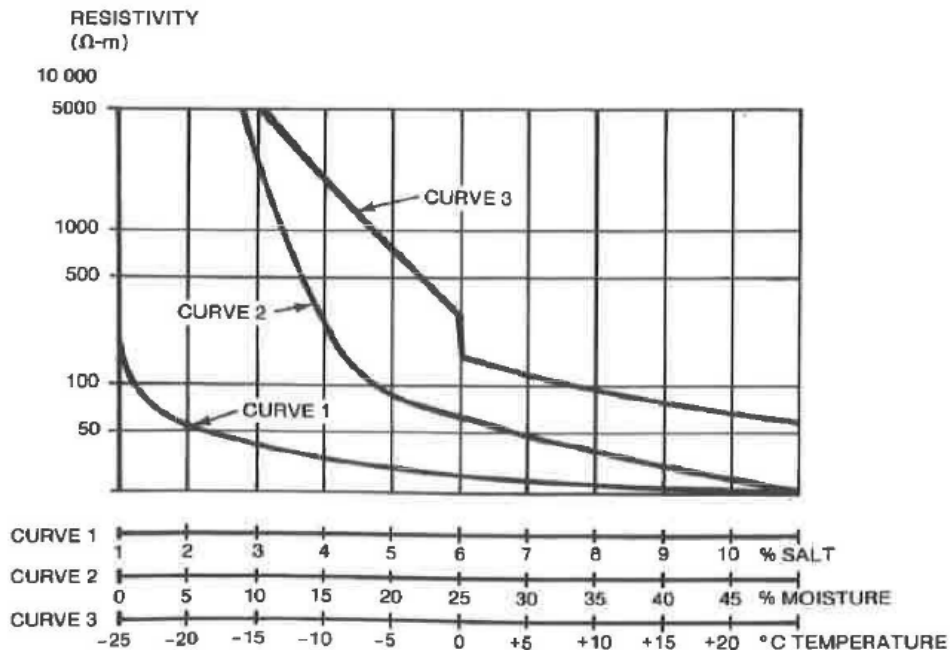


Figura 3.12 - Efectos de la Humedad, Temperatura y Sal en la resistividad del suelo

Las gráficas mostradas **no** deben usarse para realizar cálculos. En su lugar, deben realizarse mediciones usando el método presentado en el Anexo A de este manual en el lugar de la instalación.

3.9 Selección de Conductores y Conexiones

La selección adecuada del material del conductor mantendrá la integridad de un sistema de puesta a tierra durante años si los conductores son del tamaño adecuado y las condiciones del suelo no son corrosivas para el material utilizado. Para los arreglos presentados, se usan los materiales especificados en la Tabla 3.5 [1], sin embargo, es importante mencionar que estas especificaciones son requerimientos mínimos. En el caso de que la ubicación de la estructura de la línea de transmisión o subtransmisión lo requiera, será necesario evaluar qué material y qué tamaño de conductor es el más adecuado para situaciones de diseño particulares, la elección final siempre debe reflejar las consideraciones que se exponen a continuación.

Cada elemento del sistema de puesta a tierra, debe diseñarse de modo que, durante la vida útil prevista de la instalación el elemento:

- Tenga suficiente conductividad, de modo que no contribuya sustancialmente a las diferencias locales de tensión.
- Resiste la fusión y el deterioro mecánico bajo la combinación más adversa de magnitud y duración de una avería.
- Ser mecánicamente fiable y resistente en alto grado.
- Ser capaz de mantener su función incluso cuando esté expuesto a la corrosión o al maltrato físico.

Cobre

El cobre es un material ampliamente utilizado para los sistemas de puesta a tierra y es el material que en este manual se perfila como la elección adecuada para la gran mayoría de casos. Los conductores de cobre, además de su alta conductividad, son resistentes a la corrosión subterránea porque el cobre es catódico respecto a la mayoría de los demás metales probablemente enterrados cerca. El acero revestido de cobre y el acero chapado en cobre son igualmente materiales habituales en los sistemas de puesta a tierra, sobre todo cuando el robo es un problema.

Aluminio

El aluminio raramente se usa para las rejillas de tierra. Hay que tener en cuenta las siguientes desventajas:

- El propio aluminio puede corroerse en determinados suelos. La capa de material de aluminio corroído no es conductora para todos los propósitos prácticos de puesta a tierra.
- La corrosión gradual también puede ser un problema en determinadas condiciones.

No se recomienda usar conductores de aluminio bajo tierra. El aluminio es anódico a muchos otros metales, incluido el acero y, si se interconecta a uno de estos metales en presencia de un electrolito, el aluminio se sacrificará para proteger al otro metal.

Acero galvanizado

Los conductores y las varillas de tierra de acero galvanizado son aptos para aplicaciones en terrenos cuyas condiciones podrían comprometer la integridad del cobre. Por lo que, un diseño de este tipo requiere que se preste atención a la corrosión. El uso de acero galvanizado en combinación con protección catódica, es típico para los sistemas de puesta que usen este material.

Otras Consideraciones

Una rejilla de cobre o de acero revestido de cobre forma una célula galvánica con las estructuras de acero enterradas, las tuberías y cualquiera de las aleaciones a base de plomo que puedan estar presentes en las cubiertas de los cables. Esta célula galvánica puede acelerar la corrosión de estos últimos. Algunas empresas han probado a estañar el cobre. Esto reduce el potencial de la célula con respecto al acero y al zinc en un 50% aproximada y prácticamente elimina este potencial con respecto al plomo (el estaño es ligeramente sacrificial con respecto al plomo). La desventaja de utilizar un conductor de cobre estañado es que acelera y concentra la corrosión natural, causada por los productos químicos del suelo, del cobre en cualquier pequeña zona descubierta. Otros métodos utilizados con frecuencia son:

- Aislamiento de las superficies metálicas de sacrificio con un revestimiento como cinta plástica, compuesto asfáltico, o ambos.
- Enrutamiento de los elementos metálicos enterrados de forma que cualquier conductor de cobre cruce tuberías de agua u objetos similares de otros metales sin recubrimiento lo más perpendicularmente posible, y aplicación de un recubrimiento aislante a un metal u otro donde estén próximos. El revestimiento aislante suele aplicarse a la tubería.
- Protección catódica mediante ánodos de sacrificio o sistemas de corriente impresa.
- Utilización de tuberías y conductos no metálicos.

3.10 Aterrizamiento

Un valor usualmente especificado para la resistencia de puesta a tierra es uno no mayor de 25 Ω [6]. Aunque, tomando en cuenta que un objetivo de la red de puesta a tierra es incrementar la confiabilidad al mejorar el funcionamiento ante descargas atmosféricas y posibles fallas en general, se requerirán valores menores de resistencia de puesta a tierra. Como se ha mencionado anteriormente, los valores aceptables son:

- Postes troncónicos: 20 Ω
- Estructuras autosoportadas (torres de transmisión): 10 Ω

El sistema (contra-antenas y varillas) completo deberá ser enterrado por completo a la profundidad definida en la Tabla 3.1 en función del tipo de suelo donde las estructuras se encuentren. De igual manera, en el proceso de construcción de las contra-antenas deberán ser colocadas en trincheras de 30 centímetros de ancho. Estas contra-antenas deben cumplir las especificaciones mínimas expresadas en la Tabla 3.5, es posible por medio del

proceso de cálculo de conductor de tierra usar un conductor de tierra de mayor sección transversal que el especificado, pero nunca un conductor con sección transversal menor a la especificada.

Todas las conexiones del sistema a tierra (uniones entre contra-antenas y varillas, contra-antenas y bajantes, etc.) deben ser por medio de soldaduras exotérmicas, no se permitirán conductores mecánicos como mordazas, con el fin de garantizar la integridad de las conexiones entre los elementos del sistema y, por lo tanto, garantizar la integridad del sistema de puesta a tierra. El conductor de bajada para la puesta a tierra de postes deberá protegerse contra daño por impacto, utilizando tubo o cañuela de acero galvanizado de una longitud sobre el nivel del suelo de 2 metros, el cual será sujetado al poste mediante tres puntos de amarre, como mínimo, empleando cinta metálica tipo band-it.

Todo sistema de distribución debe tener referencia a tierra, por seguridad de las personas y de todos los equipos instalados en el mismo; por tanto, toda línea nueva o extensión de línea de 46kV deberá construirse con neutro corrido multiaterrizado, independientemente que se construya o no distribución eléctrica en baja tensión. La característica de neutro multiaterrizado, se refiere a que el conductor eléctrico destinado para tal fin está conectado sólidamente a tierra al menos en cuatro puntos por cada milla (1.6 km) [6].

3.11 Condiciones de Operación

El sistema de puesta a tierra descrito en este manual aplica en cualquier tipo de terreno bajo cualquier condición ambiental en El Salvador y a cualquier altura sobre el nivel del mar para los sistemas de 46kV, 115kV y 230kV.

3.12 Consideraciones para Mediciones de Campo de una Puesta a Tierra

Las mediciones de resistividad del suelo y resistencia de tierra introducen diversas complejidades que no se encuentran en otros procesos de medición de resistividad o resistencia. En algunas situaciones podría incluso ser necesario realizar varias mediciones para poder analizar los datos obtenidos, corrientes parásitas y otros factores pueden intervenir en los resultados de mediciones.

Estas dificultades pueden llegar a ser menos apreciables en terrenos rurales o remotos, sin embargo, en zonas más desarrolladas o expuestas al crecimiento industrial debido a la presencia de estructuras o elementos metálicos en contacto o enterrados bajo el suelo que introducen errores en mediciones. Para incrementar la precisión de las mediciones previo

a la construcción y poder compararlos con los valores calculados, se recomienda que la conexión de cables de guarda y otros elementos metálicos se haga posterior a las mediciones para evitar interferencias [7].

3.13 Diseño en Condiciones Difíciles

Los arreglos presentados en este manual han sido diseñados como diseños generales, donde en la mayoría de casos podrán ser utilizados sin sufrir mayores modificaciones o revisiones en su diseño. Sin embargo, siempre existe la posibilidad de encontrar retos u obstáculos que prevengan la aplicación de los diseños mostrados, para los cuales se tendrán que evaluar los diseños según las necesidades y limitaciones propias de cada estructura o zona; estas dificultades podrían ser, pero no están limitadas a suelos muy poco uniformes, limitaciones de espacio o limitaciones por la resistividad del suelo donde por diversas razones no puedan ser implementadas las múltiples etapas de los diseños de resistividad alta del suelo. En zonas donde la resistividad del suelo es bastante alta o el espacio es reducido, puede que no sea posible obtener un sistema de puesta a tierra de baja impedancia extendiendo los electrodos de la red por una gran superficie, como se hace en condiciones más favorables. Esto dificulta a menudo el control de los gradientes superficiales y limita el correcto desempeño ante descargas atmosféricas de las líneas de transmisión/subtransmisión, resultando en una menor confiabilidad ante eventos meteorológicos. Algunas sugerencias incluyen:

- Utilización de varillas de puesta a tierra de longitud mayor a 3 metros y pozos de tierra perforados.
- Diversos aditivos y tratamientos del suelo utilizados junto con las varillas de tierra y los conductores de interconexión.
- Cuando sea factible, uso controlado de otros medios disponibles para reducir la resistencia global de un sistema de tierra, como la conexión de cables estáticos y neutros a tierra. Típico es el uso de objetos metálicos en el emplazamiento que reúnan las condiciones y puedan servir como electrodos auxiliares de tierra, o como conexiones de tierra a otros sistemas. Las consecuencias de tales aplicaciones, por supuesto, deben evaluarse cuidadosamente.
- Utilizar un depósito cercano de material de baja resistividad de volumen suficiente para instalar una red adicional (satélite). Esta red satélite, cuando esté suficientemente conectada a la red principal, reducirá la resistencia global y, por lo tanto, el aumento del potencial de tierra de la red de tierra. El material cercano de baja resistividad puede ser un depósito de arcilla o puede formar parte de alguna estructura grande, como la masa de hormigón de una presa hidroeléctrica.
- Uso de múltiples contra-antenas.

La evaluación de la factibilidad y eficiencia de cada opción será una tarea perteneciente al diseñador de la red de tierra, ya que dependiendo de cada situación pueden encontrarse opciones más prácticas que otras, por ejemplo, introducir en el diseño varillas más largas puede ser más eficiente en costos y proceso constructivo que la construcción de redes satélite o el tratamiento químico del suelo.

3.14 Mantenimiento e Integridad del Sistema

Como parte del mantenimiento de las redes de puesta a tierra, se deben realizar inspecciones, mediciones de resistencia y de continuidad de forma periódica para verificar su integridad, con el propósito de asegurar que la red de tierra haya sido instalada de forma correcta y asegurar que no presente daños por descargas atmosféricas o vandalismo.

Para este fin, no existen requerimientos específicos acerca del procedimiento o métodos a realizar para las pruebas de sistemas de tierra, sin embargo, las siguientes acciones pueden ser realizadas en el sitio para confirmar que la red de puesta a tierra está en buenas condiciones:

- Inspecciones físicas, confirmando que todos los elementos inicialmente instalados se encuentren presentes y en condiciones aceptables. Principalmente, combate el vandalismo (robo de elementos de cobre o copperweld), sin embargo, puede ser usado también para evaluación de daños por descargas atmosféricas.
- Mediciones de resistencia de tierra en cada contra-antena. Los valores deben permanecer constantes (con variaciones aceptables entre época seca y época lluviosa, debido al incremento de contenido de humedad del suelo). En caso se obtenga una medición con un valor mayor al resto de las contra-antenas, puede ser tomado como un indicador de problemas y una inspección visual debe ser realizada, realizando una excavación si el problema no es visible.

Diversos otros métodos pueden ser utilizados, por ejemplo, los métodos de continuidad descritos en IEEE Std 81-2012; sin embargo, las inspecciones físicas y mediciones de resistencia de tierra resultan procesos más sencillos de realizar.

3.15 Anexo A. Medición de Resistividad del Suelo

A.1 Método de Wenner

El método de Wenner usa cuatro sondas auxiliares en la tierra, todas a una profundidad b y espaciadas (en línea recta) a intervalos a . Se hace pasar una corriente de prueba I entre las dos sondas exteriores, y el potencial V entre las dos sondas interiores se mide con un

potenciómetro o un voltímetro de alta impedancia. Entonces, la relación V/I da la resistencia R en ohmios.

Los materiales requeridos son [5]:

- Medidor de resistencia de baja frecuencia (60 a 200Hz con capacidad de inyección de corriente de 10 mA), analógico o digital
- Electrodo verticales de acero inoxidable, galvanizado o con revestimiento de cobre soldado. De 40 a 60cm de longitud por 6mm de diámetro mínimo, con punta en un extremo
- Cables de cobre aislado para conexión de sección transversal mínima de 2mm^2 con caimanes en un extremo y en el otro la terminal adecuada al medidor de resistencia que se utilice, siendo la más común la del tipo banana

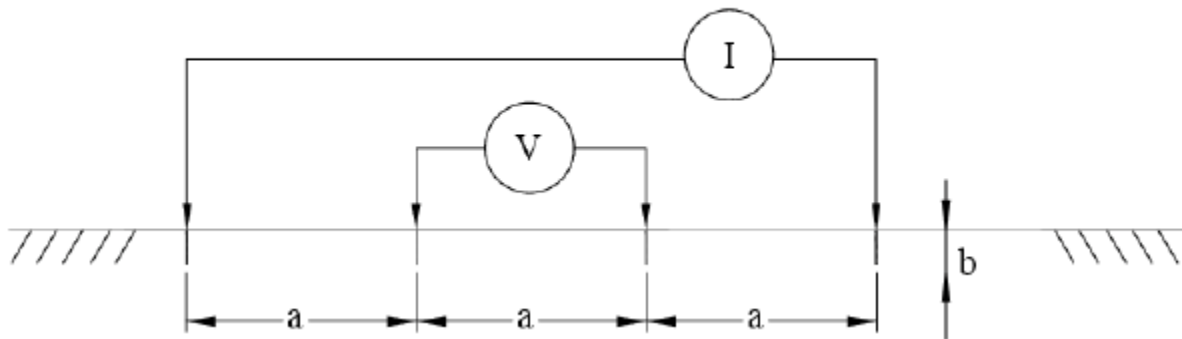


Figura 3.13 - Método de Wenner para Medición de Resistividad de Suelo

Las sondas se colocan igualmente espaciadas, como se muestra en la Figura 3.13. Sea a la distancia entre dos sondas adyacentes. Entonces, la resistividad aproximada ρ para una profundidad a en términos de las unidades de longitud en las que se miden a y b es:

$$\rho = 2\pi a^2 R / b \quad (7)$$

Donde:

a : Separación entre electrodos [m]

R : Resistencia medida [Ω]

ρ : Resistividad aparente del suelo [$\Omega\cdot\text{m}$]

Un conjunto de lecturas tomadas con varios espaciamientos de sonda da un conjunto de resistividades que, cuando se grafican contra el espaciamiento, indica si existen capas distintas de suelo o roca diferentes y da una idea de sus respectivas resistividades y profundidad.

3.16 Anexo B. Medición de Resistencia de Red de Tierra

B.1 Método de Caída de Potencial

El método de caída de potencial es un método de medición sencillo que implica hacer pasar una corriente entre un electrodo de tierra (G) y un electrodo de corriente (CP), y luego medir el voltaje entre G y un electrodo de potencial (PP), como se muestra en la Figura 3.15. Para minimizar las influencias entre electrodos debidas a resistencias mutuas, el electrodo de corriente generalmente se coloca a una distancia considerable del electrodo de tierra bajo prueba.

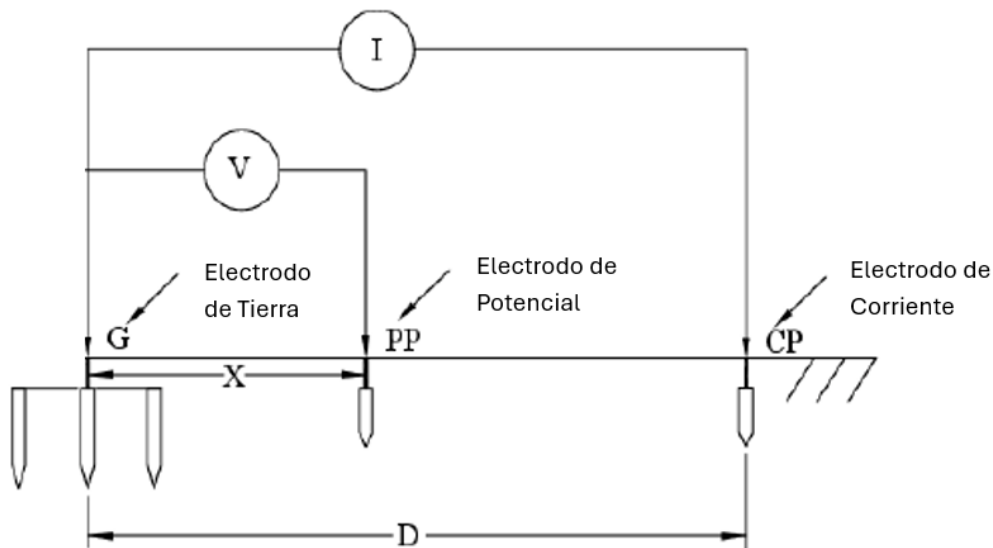


Figura 3.14 - Método de Caída de Potencial para Medición de Resistencia de Red de Puesta a Tierra

Típicamente, esta distancia es de al menos cinco veces la dimensión más grande del electrodo de tierra bajo prueba. El electrodo de potencial se coloca normalmente en la misma dirección que el electrodo de corriente, pero puede colocarse en la dirección opuesta, como se muestra en la Figura 6. En la práctica, la distancia para el electrodo de potencial se elige a menudo como el 62% de la distancia del electrodo de corriente cuando los electrodos de corriente y potencial están en la misma dirección (regla del 62%). Esta distancia se basa en la posición teóricamente correcta para medir la impedancia exacta del electrodo para un suelo con resistividad uniforme, se asume una distancia suficiente entre el electrodo de tierra bajo prueba y las sondas de prueba presentes para permitir que las sondas de prueba sean consideradas como un hemisferio, y asume además que el electrodo de tierra no tiene interconexiones externas [7].

Una vez satisfechos los criterios para la sonda de corriente, la ubicación de la sonda de potencial es crítica para medir con precisión la resistencia del electrodo de tierra. La ubicación debe estar libre de cualquier influencia tanto del electrodo de tierra bajo prueba como de la sonda de corriente. Una forma práctica de determinar si la sonda de potencial está libre de influencias de otros electrodos es obtener varias lecturas de resistencia moviendo la sonda de potencial entre la malla de tierra y la sonda de corriente. Se puede asumir que dos o tres lecturas de resistencia constantes y consecutivas representan el valor verdadero de la resistencia. El proceso de medición se describe como [5]:

- Determinar la dirección de medición con respecto a la línea aérea, siendo longitudinal o perpendicular solo en los casos donde no se pueda medir paralelo a la línea.
- Instalar el electrodo auxiliar de corriente y su cable asociado en la dirección seleccionada a 50m del electrodo E (el cual está conectado a la red de tierra) cuando la longitud de la contra-antena sea menor o igual a 12m. Para longitudes mayores, el electrodo se conectará a 75m del electrodo E.
- Instalar el electrodo auxiliar de potencial a 52% de la distancia total d_{E-C} , realizando la primera medición
- La segunda medición se realiza con el electrodo de potencial a 62% de la distancia total d_{E-C}
- Finalmente, la tercera medición se realiza con el electrodo de potencial a 72% de la distancia total d_{E-C}
- En caso las mediciones tomadas no sean consistentes, se debe duplicar la distancia total d_{E-C} hasta que sí lo sean.

El valor representativo de la resistencia de la red de puesta a tierra se considera como el valor correspondiente a la lectura cuando el electrodo de potencial se encuentra al 62% de la distancia d_{E-C}

3.17 Anexo C. Longitud Efectiva Ante Descargas Atmosféricas

La caída de tensión producida por una descarga atmosférica se acentúa intensamente en las secciones por donde se inyecta la corriente y tiende a disminuir rápidamente hacia las secciones donde debe avanzar posteriormente dicha corriente, Esta distribución la causa principalmente la inductancia propia del conductor. Al darse dicha distribución de tensiones, la corriente se debe drenar en mayor cantidad en las primeras secciones del conductor y debe tender rápidamente a disminuir hacia las secciones más alejadas del punto de inyección de corriente.

Como resultado, debe haber secciones de conductor (las más alejadas) que prácticamente no deben colaborar para la dispersión de la corriente al subsuelo. El punto en el cual estas secciones de conductores prácticamente ya no deben drenar corriente va a depender de la distribución del potencial. Esta distribución debe estar principalmente definida por el efecto conjunto del frente de onda de la corriente y la inductancia del conductor, así como por la resistividad equivalente del subsuelo.

Para calcular la longitud efectiva de una contra-antena se utiliza la siguiente fórmula [8]:

$$L_{ef} = A\sqrt{T_f\rho_e} \quad (8)$$

Donde:

L_{ef} : Longitud efectiva de la contra-antena [m]

T_f : Tiempo de frente de onda [μ s]

ρ_e : Resistividad equivalente del suelo [Ω -m]

A: Coeficiente según geometría de arreglo:

- 1.40 para un electrodo horizontal conectado en un extremo
- 1.55 para un electrodo horizontal conectado en el centro (radial)
- 1.85 para configuración de estrella de 4 brazos

En la siguiente tabla se presentan cálculos usando la formula anterior tanto para postes y torres de transmisión con los arreglos presentados en el presente manual, a manera de referencia.

Frente de onda [μ s]	Resistividad Equivalente [Ω -m]	Longitud Efectiva Postes [m]	Longitud Efectiva Torres [m]
3	100	26.85	32.04
3	300	46.50	55.50
3	500	60.03	71.65
3	750	73.52	87.75
3	1000	84.90	101.33
5	100	34.66	41.37
5	300	60.03	71.65
5	500	77.50	92.50
5	750	94.92	113.29
5	1000	109.60	130.81

Tabla 3.6 - Longitud Efectiva de una Contra-Antena para Diferentes Valores de Frente de Onda, Resistividad del Subsuelo y Tipo de Arreglo de Puesta a Tierra

Para el diseño o instalación de un sistema de puesta a tierra, no se debe exceder la longitud efectiva de una contra-antena para un tiempo de frente de onda de $5\mu\text{s}$ considerando el valor de resistividad equivalente del subsuelo [5].

3.18 Anexo D. Cálculo de conductor de tierra

Si se estima necesario, es posible calcular el área necesaria en mm^2 del conductor de las contra-antenas usando la siguiente ecuación:

$$A_{\text{mm}^2} = I_F \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\text{TCAP} \times 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}\right)}} \quad (9)$$

Donde:

A_{mm^2} = Área transversal del conductor de tierra [mm^2]

I_F = Corriente RMS de falla [kA]

$K_o = 1/\alpha_o$ o $(1/\alpha_r) - T_r$ [$^{\circ}\text{C}$]

T_m = Temperatura máxima permisible (fusión) [$^{\circ}\text{C}$]

T_a = Temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$]

T_r = Temperatura de referencia para el material [$^{\circ}\text{C}$]

α_o = Coeficiente de resistividad térmica a 0°C [$1/^{\circ}\text{C}$]

α_r = Coeficiente de resistividad térmica a la temperatura de referencia T_r [$1/^{\circ}\text{C}$]

ρ_r = Resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia T_r [$\mu\Omega\text{-cm}$]

t_c = Duración de la corriente [s]

TCAP = Capacidad térmica por unidad de volumen, [$\text{J}/(\text{cm}^3 * ^{\circ}\text{C})$]

La Tabla 3.7 proporciona los datos para las constantes α_r , K_o , T_m , ρ_r , y TCAP [1].

La fórmula anterior puede ser simplificada a:

$$A_{\text{kcmil}} = I_F K_f \sqrt{t_c} \quad (10)$$

Donde:

A_{kcmil} = Área transversal del conductor de tierra [kcmil]

I_F = Corriente RMS de falla [kA]

K_f = Constante obtenida de la Tabla 3.7 para el material a valores varios de T_m y usando temperatura ambiente de 40 °C

t_c = Duración de la corriente [s]

Material	Conductividad (%)	α_r a 20°C	K_o a 0°C	T_m [°C]	ρ_r a 20°C	TCAP
Cobre recocido de temple suave	100.0	0.00393	234	1083	1.72	3.4
Cobre, comercial de temple duro	97.0	0.00381	242	1084	1.78	3.4
Conductor de acero Copper-clad	40.0	0.00378	245	1084	4.40	3.8
Conductor de acero Copper-clad	30.0	0.00378	245	1084	5.86	3.8
Varilla de acero Copper-clad	17.0	0.00378	245	1084	10.1	3.8
Conductor de aluminio Copper-clad	20.3	0.00360	258	657	8.48	3.561
Acero, 1020	10.8	0.00377	245	1510	15.90	3.8
Varilla de acero inoxidable	9.8	0.00377	245	1400	17.50	4.4
Varilla de acero, chapado de zinc	8.6	0.00320	293	419	20.10	3.9
Acero inoxidable, 304	2.4	0.00130	749	1400	72.00	4.0

Tabla 3.7 - Constantes de Materiales, Cálculo de Conductor de Tierra

Material	Conductividad (%)	T _m (°C)	K _f
Cobre recocido de temple suave	100.0	1083	7.00
Cobre, comercial de temple duro	97.0	1084	7.06
Cobre, comercial de temple duro	97.0	250	11.78
Conductor de acero Copper-clad	40.0	1084	10.45
Conductor de acero Copper-clad	30.0	1084	12.06
Varilla de acero Copper-clad	17.0	1084	14.64
Conductor de aluminio Copper-clad	20.3	657	17.26
Acero, 1020	10.8	1510	18.39
Varilla de acero inoxidable	9.8	1400	14.72
Varilla de acero, chapado de zinc	8.6	419	28.96
Acero inoxidable, 304	2.4	1400	30.05

Tabla 3.8 - Constantes de Materiales, Cálculo de Conductor de Tierra.

Capítulo 4 - Análisis y Comparativa, Modelado por Software

4.1 Notas. Estado Actual.

Debido a la falta de un proceso de diseño estandarizado por medio de códigos, manuales de diseño o normas nacionales para las puestas de red de tierra en El Salvador para las líneas de subtransmisión y transmisión en El Salvador, se tiene poca información acerca del diseño y construcción de las redes de puesta a tierra en las estructuras del sistema eléctrico de potencia. Esto hace inferir que a pesar de que existan normas internacionales que pueden funcionar como una guía (como Red de Puesta a Tierra Para Estructura de Líneas de Transmisión Aéreas de 69kV a 400kV en Construcción, de la Comisión Federal de Electricidad en México) se produzcan marcadas diferencias entre diseños de líneas.

Para evaluar esa hipótesis, se han obtenido datos y procesos de diseño de primera mano con personal con experiencia en el campo en El Salvador; buscando evaluar no solo posibles diferencias apreciables entre el proceso de diseño utilizado históricamente y el proceso de diseño propuesto por medio del manual presentado, sino también recabar información acerca de experiencias en campo con la construcción y mantenimiento de las redes de tierra. Esto se ha realizado al obtener datos de especificación de diseño de redes de tierra y por medio de entrevistas.

Al evaluar la información obtenida es posible confirmar que, por el momento, no se usa ningún estándar o código de diseño creado o adaptado para el país. Actualmente, los criterios y procesos de diseños se extraen de normas internacionales las cuales son principalmente IEEE, como IEEE Std 80, IEEE Std 1243 y IEEE Std 142. Sin embargo, estas normas están principalmente orientadas hacia subestaciones, lo cual hace que el uso de la literatura disponible sea interpretación del ingeniero de diseño para los criterios aplicables a los diseños finales de redes de puesta a tierra de las líneas de subtransmisión/transmisión, siendo muy dependiente de la experiencia previa en diseños, utilizando prácticas o criterios que han sido útiles en sistemas diseñados con anterioridad por el mismo diseñador o por la organización de la cual es parte.

El criterio usado para la aceptación de una red de puesta a tierra es extraído de la norma CFE 00J0052 (Red de Puesta a Tierra Para Estructura de Líneas de Transmisión Aéreas de 69kV a 400kV en Construcción), la cual por el momento y dentro de los límites de investigación del presente trabajo, es la única norma internacional que aborda de forma explícita los procesos de diseño para redes de tierra de líneas aéreas de transmisión.

Se logran obtener datos de especificación de un diseño para una línea de 115kV, los cuales son:

- Material de varillas: Acero galvanizado
- Diámetro varillas: 19mm (3/4")
- Longitud de varillas: 3 metros
- Material de contra-antenas: Cable galvanizado de alta resistencia
- Diámetro de contra-antenas: 10mm (3/8")
- Uso de conectores mecánicos en algunos escenarios

También se obtienen datos de especificación de diseño para una puesta a tierra de una línea de 230kV, los cuales son:

- Material de varillas: Núcleo de acero con recubrimiento de cobre (especificación ACE-16, Según CFE 56100-16)
- Diámetro varillas: 15.86mm (5/8")
- Longitud de varillas: 3 metros
- Material de contra-antenas: Cable copperweld, acero-cobre
- Diámetro de contra-antenas: 13.87mm (especificación calibre ACS7-5), o #2 AWG
- Uso de conectores mecánicos en algunos escenarios junto a soldaduras exotérmicas

Para ambos escenarios se tiene en común que no hay un arreglo geométrico predeterminado para el sistema de puesta a tierra. Por ejemplo, en el caso de torres de transmisión es posible encontrar algunas estructuras con polarización en algunas patas (dos de cuatro, polarizadas en patas diagonalmente opuestas), y otras con todas sus patas conectadas efectivamente a tierra. Un punto en común es añadir más etapas a los diseños de red de tierra (incrementando la longitud de las contra-antenas y la cantidad de varillas de tierra usadas) al encontrar valores más altos de resistividad del suelo. La longitud de cada etapa y la separación entre las varillas puede variar de escenario a escenario.

En contraste con lo propuesto en el manual actual y la especificación mexicana de CFE, no se hace una diferenciación en el uso del suelo para la profundidad de enterramiento de las contra-antenas, usando profundidades que pueden variar entre los 0.50 y los 0.80 metros. En el caso de suelos rocosos, si se busca una profundidad menor debido a las limitaciones del terreno, pero no se especifica un valor o rango de valores comúnmente usado.

Un problema común en El Salvador en las puestas a tierra es el vandalismo, ya que los elementos de cobre son hurtados con el fin de vender el material, sin embargo, esto lleva a que no solo elementos de cobre sean hurtados, sino también elementos que puedan

parecer 100% cobre (como el copperweld). Esto impacta de forma directa sobre la confiabilidad de los sistemas de potencia debido a que las redes de protección no funcionarán como han sido diseñadas y pueden causar salidas de línea, afectando a todos los usuarios. Con el fin de evitar o al menos mitigar este tipo de inconvenientes hay dos soluciones usadas:

- Uso de elementos de acero galvanizado. Ya que el acero galvanizado carece del brillo característico del cobre, las personas que usualmente hurtan ese tipo de materiales no se muestran interesadas en cables de acero y los dejan en su sitio.
- Uso de conexiones embebidas en concreto. Con el fin de no dejar elementos expuestos/a la vista, se realizan soldaduras exotérmicas al chasis de las torres auto-soportadas con el fin de desincentivar por completo el robo de elementos de cobre.

El Salvador es un país con una alta incidencia de descargas atmosféricas en la época lluviosa, por lo que los daños producidos por rayos son comunes en el sistema eléctrico de potencia. Usualmente estos daños se encuentran en los cables de guarda de las líneas de transmisión/subtransmisión, presentando desde roturas parciales (es decir, algunos hilos del cable) o en casos más graves, una rotura total del cable de guarda. El mantenimiento preventivo usualmente consiste en inspecciones físicas de las estructuras y de los cables de guarda donde se han producido salidas de línea o eventos de disparo de protecciones eléctricas. Existen también algunos casos en los que las descargas atmosféricas han tenido mayor potencial destructivo, ya que se han encontrado fundaciones de concreto agrietadas por sobretensiones; sin embargo, la incidencia de estos casos es baja.

4.2 Comparativa. Modelado por Software.

Para llevar a cabo el modelado y simulación de las estructuras y arreglos propuestos de la red de puesta a tierra de líneas aéreas de transmisión y de distribución, se utiliza el software CYMGRD con los siguientes parámetros básicos:

Ajustes para el suelo:

- Modelo de suelo uniforme: resistividad de suelo definida por usuario
- Seguridad basada en IEEE 80-2000
- Duración de choque: 0.5 segundos
- Peso corporal: 70 kilogramos
- Grosor de capa de material de superficie: 0 m
- Temperatura ambiente: 25°C

Estos parámetros se muestran en la siguiente ilustración tomada del cuadro de diálogo dentro de CYMGRD (nota: a pesar de que CYMGRD muestra parametrización de capa superior, inferior y de capas de material de superficie, estos valores por los ajustes seleccionados de modelo de una capa y la no presencia de una capa de material de superficie provocan que no haya influencia alguna en los resultados de la simulación):

The image shows a dialog box titled "Soil Parameters" with a close button (X) in the top right corner. The dialog is organized into several sections, each with a title and a list of parameters:

- Title:** A text field containing "Untitled".
- Model:** A dropdown menu set to "Uniform (from Soil Measurements)".
- Upper Layer Thickness:** A text field with "0.3" and the unit "meters".
- Upper Layer Material:** A dropdown menu set to "User Defined".
- Upper Layer Resistivity:** A text field with "105.08" and the unit "ohm-m".
- Lower Layer Material:** A dropdown menu set to "User Defined".
- Lower Layer Resistivity:** A text field with "61.45" and the unit "ohm-m".
- Safety:** A dropdown menu set to "IEEE Std. 80-2000".
- Shock Duration:** A text field with "0.5" and the unit "secs".
- Body Weight:** A dropdown menu set to "70" and the unit "kg".
- Surface Layer Thickness:** A text field with "0" and the unit "meters".
- Surface Layer Material:** A dropdown menu set to "User Defined".
- Surface Layer Resistivity:** A text field with "2500" and the unit "ohm-m".
- Electrode Sizing:** A text field with "25" and the unit "°C".

At the bottom of the dialog are two buttons: "OK" and "Cancel".

Ilustración 4-1 - Ajustes de Suelo en CYMGRD

Ajustes de malla:

- Conductores: Acero Copper-clad

- Conductividad: 30
- Factor alfa: 0.00378 [1/C°]
- ρ_r : 5.86 [$\mu\Omega$ -m]
- Conductores: Acero Copper-clad
 - Conductividad: 20
 - Factor alfa: 0.00378 [1/C°]
 - ρ_r : 8.62 [$\mu\Omega$ -m]
- Frecuencia nominal: 60 Hz
- Corriente de retorno: 0 A

Estos parámetros se muestran en la siguiente ilustración tomada del cuadro de diálogo dentro de CYMGRD:

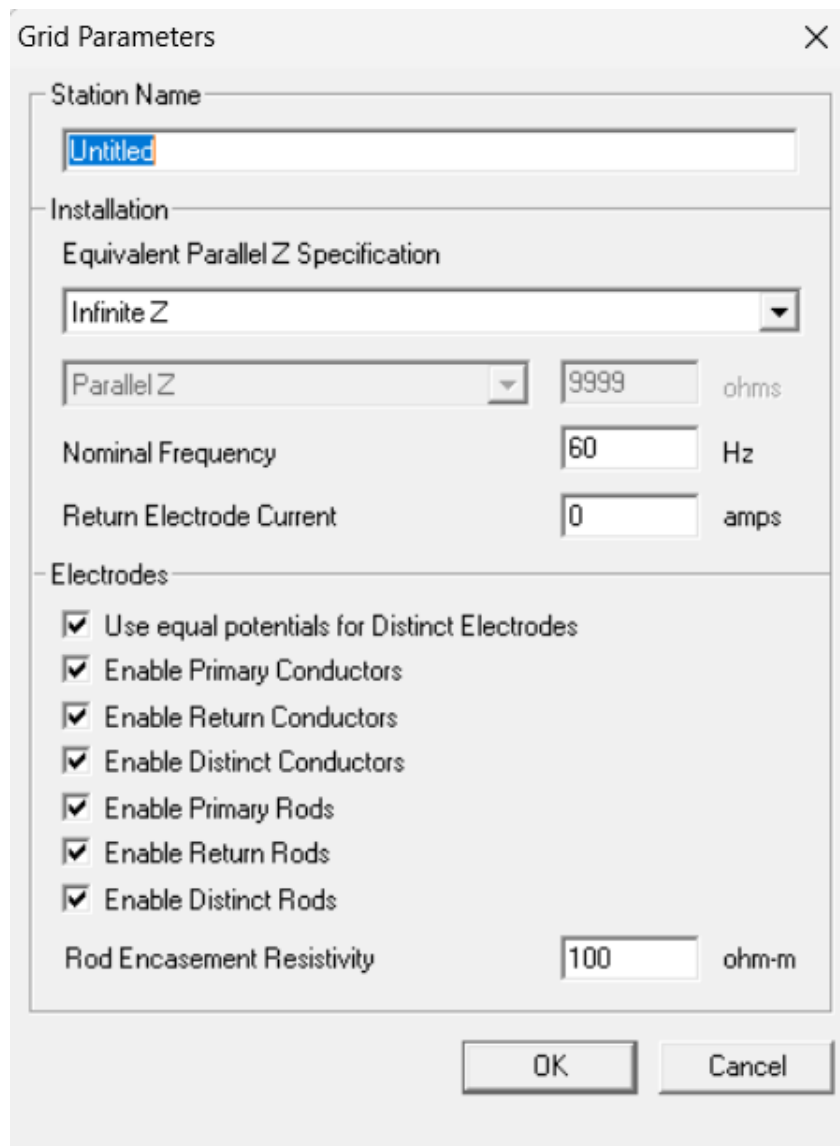


Ilustración 4-2 - Ajustes de CYMGRD para Malla

Ajustes de bus:

- Corriente de falla: 1000 Amperios
- Porcentaje de contribución remota: 100%
- Relación X/R: 10
- Líneas de transmisión: 1

Estos parámetros se muestran en la siguiente ilustración tomada del cuadro de diálogo dentro de CYMGRD:

	Enabled	Bus ID	LG Fault Current (amps)	Remote Contribution (%)	LG X/R	Rtg (ohms)	Transmission Lines	Rdg (ohms)	Distribution Feeders
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Unknown	1000	100	10	100	1	200	1
2	<input checked="" type="checkbox"/>								

Ilustración 4-3 - Ajustes de CYMGRD para Buses

Los ajustes mostrados anteriormente son utilizados para la simulación de los modelos y arreglos presentados anteriormente en el Capítulo 3; todos los casos se simularán con el límite superior de cada intervalo para permitir el análisis del desempeño de cada arreglo en las condiciones más críticas esperadas, en término de los valores de resistividad del suelo.

4.2.1 Estructuras Auto Soportadas

Como modelo base para todas las simulaciones, se toma una torre de transmisión cuyas dimensiones entre sus bases son:

- 5m de largo
- 5m de ancho

De la misma manera, se modelan las fundaciones como 4 electrodos verticales de 3m de profundidad y 0.10 m de diámetro. Estos electrodos son también modelados con una envolvente de concreto de 0.70 m de diámetro, y se toma como resistividad del concreto un valor de 100 Ω. Como parámetro adicional en los casos de simulación, también se muestran los valores de resistencia del arreglo de la red de tierra en función del tipo de

terreno donde se encuentran, variando la profundidad de enterramiento de las contra-antenas y varillas entre 0.4 metros y 1.5 metros.

Caso 1, arreglo AS1. Resistividad 1 a 100 Ω -m, vista de planta:

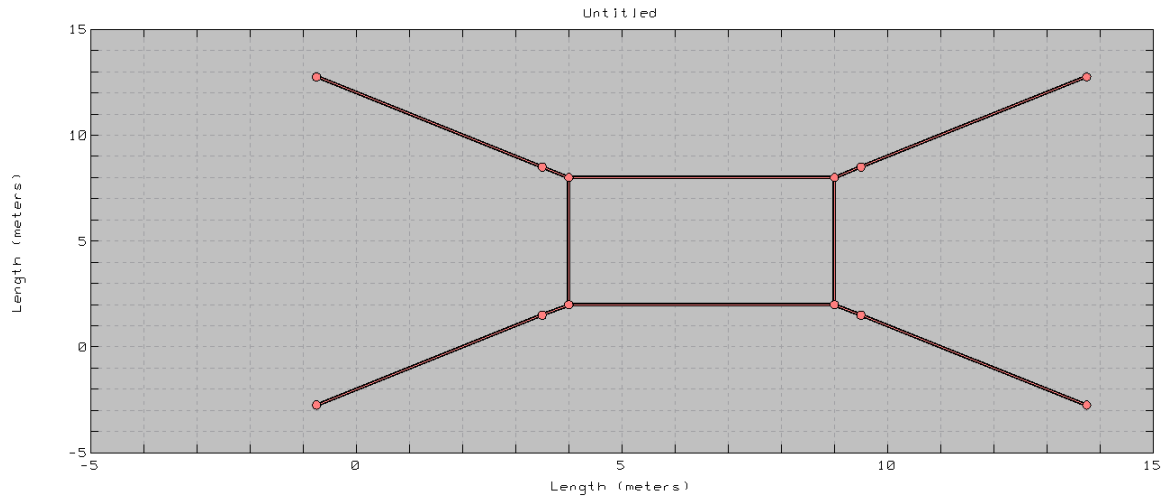


Figura 4.1 – Vista en Planta de Arreglo AS1 en CYMGRD para una Estructura Auto Soportada en un Terreno Con Resistividad Entre 1 y 100 Ω -m

Vista en 3D:

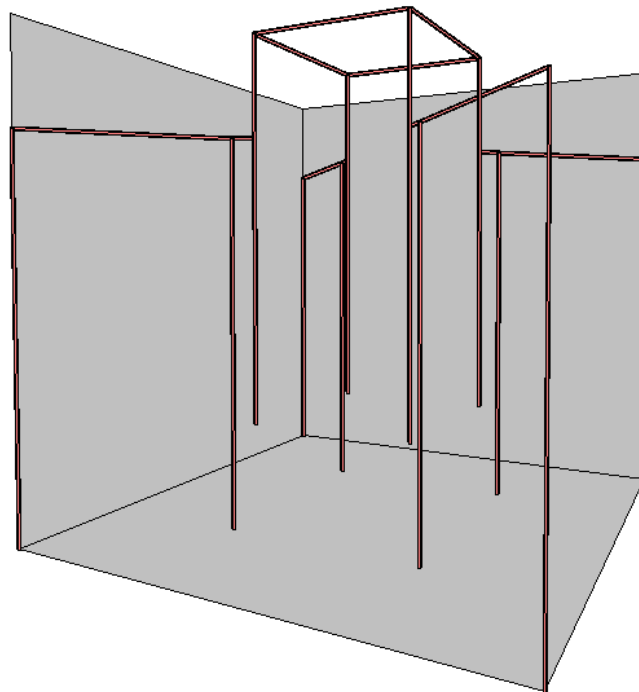


Figura 4.2 – Vista en 3D de Arreglo AS1 en CYMGRD para una Estructura Auto Soportada en un Terreno Con Resistividad Entre 1 y 100 Ω -m

Resultados de simulación, resistividad de suelo: 100 Ω -m:

Tipo de Terreno	Profundidad (m)	Resistencia de Red de Tierra (Ω)
Rocoso	0.4	3.7497
No Cultivable	0.8	3.6375
Cultivable	1.5	3.5010

Tabla 4.1 - Resultados Para Simulación en CYMGRD Para Resistividad de Suelo de 100 Ω -m

Caso 2, arreglo AS2. Resistividad 101 a 300 Ω -m, vista de planta:

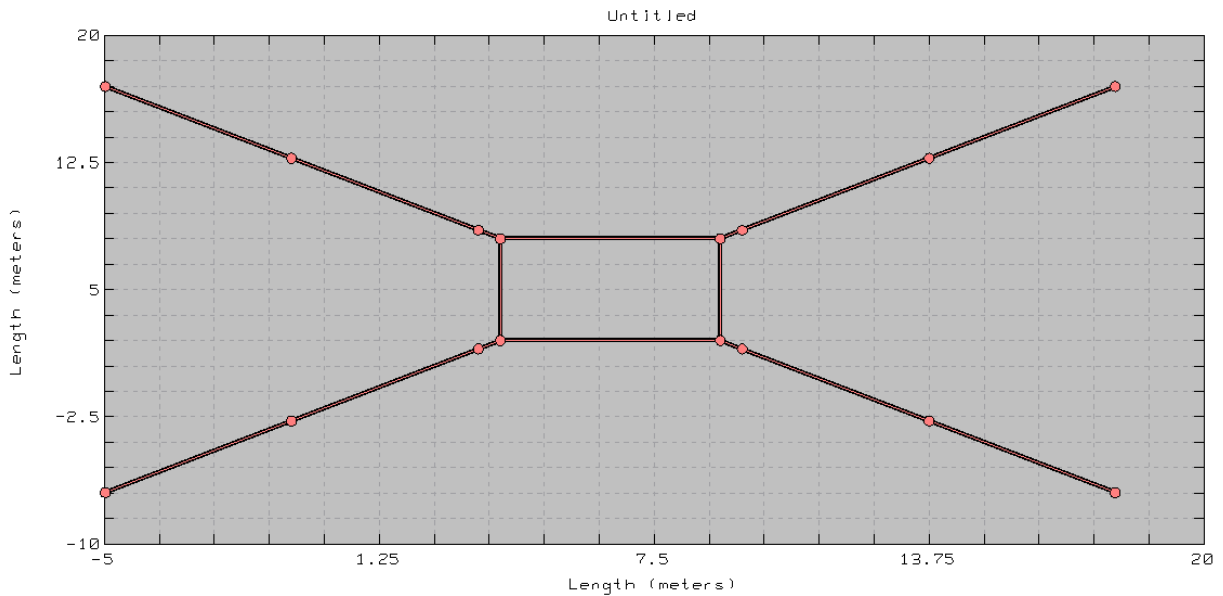


Figura 4.3 - Vista en Planta de Arreglo AS2 en CYMGRD para una Estructura Auto Soportada en un Terreno Con Resistividad Entre 101 y 300 Ω -m

Vista en 3D:

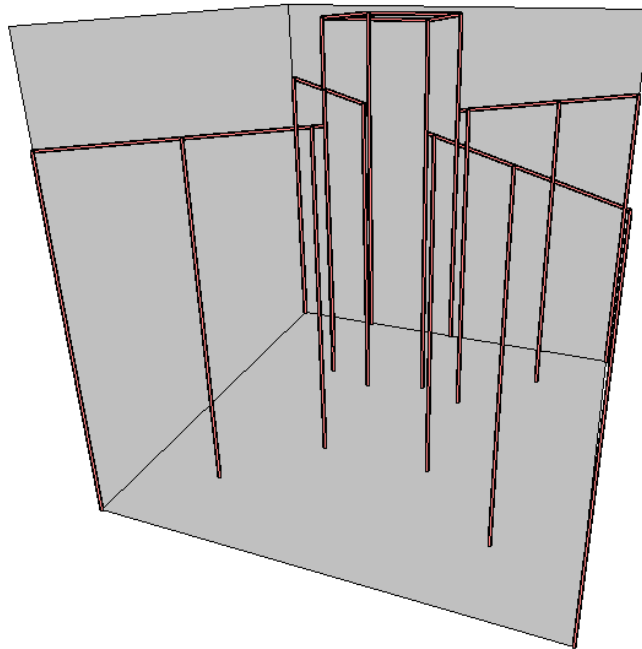


Figura 4.4 - Vista en 3D de Arreglo AS2 en CYMGRD para una Estructura Auto Soportada en un Terreno Con Resistividad Entre 101 y 300 Ω -m

Resultados de simulación, resistividad de suelo: 300 Ω -m:

Tipo de Terreno	Profundidad (m)	Resistencia de Red de Tierra (Ω)
Rocoso	0.4	7.9707
No Cultivable	0.8	7.7471
Cultivable	1.5	7.4817

Tabla 4.2 - Resultados Para Simulación en CYMGRD Para Resistividad de Suelo de 300 Ω -m

Caso 3. Resistividad 301 a 500 Ω -m, vista de planta:

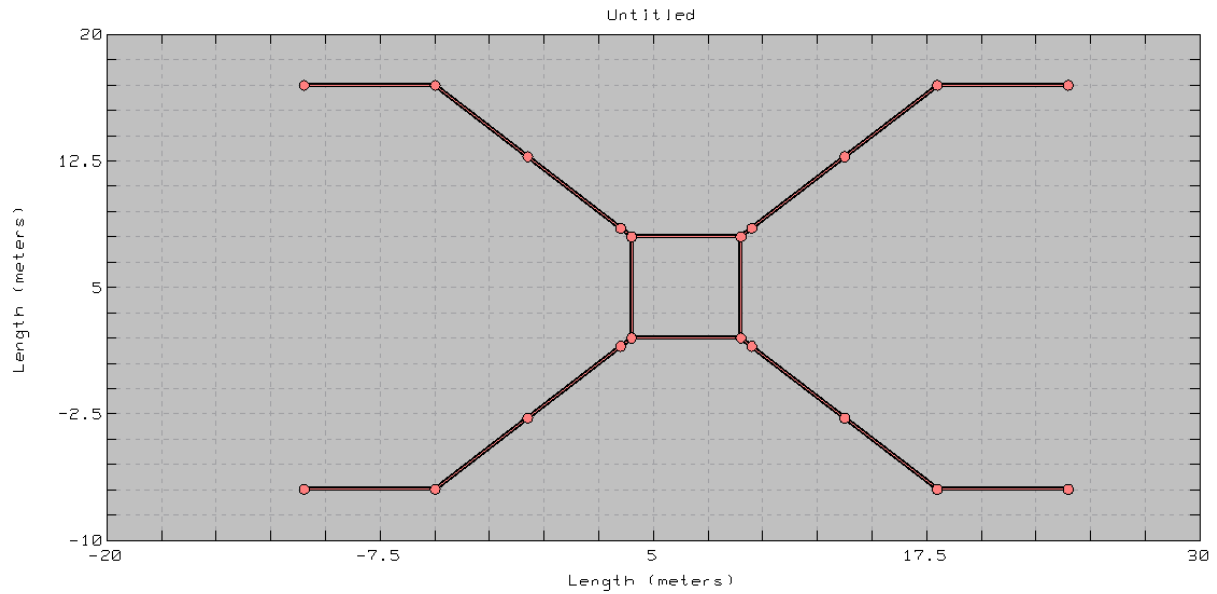


Figura 4.5 - Vista en Planta de Arreglo AS3 en CYMGRD para una Estructura Auto Soportada en un Terreno Con Resistividad Entre 301 y 500 Ω -m

Vista en 3D:

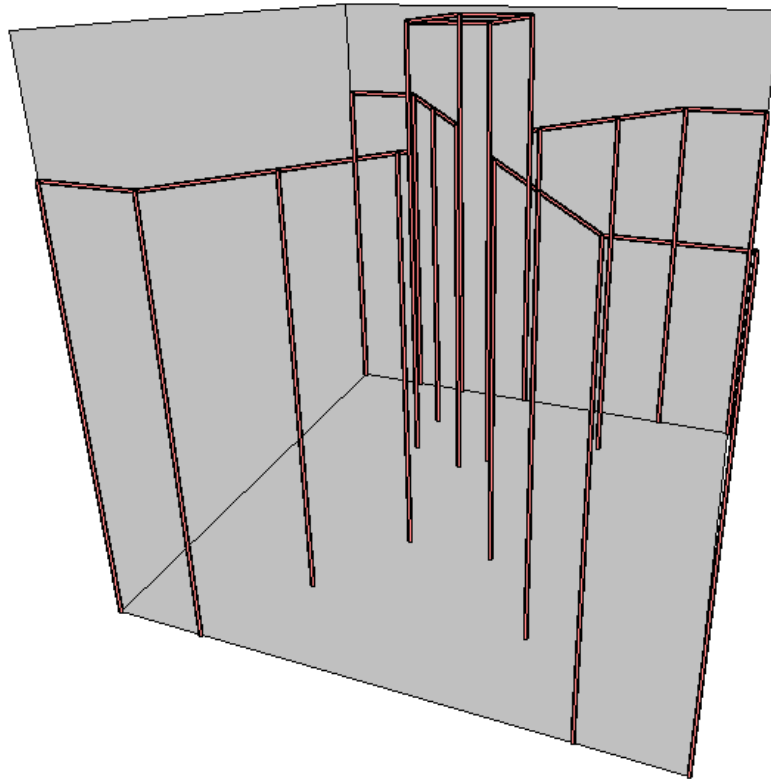


Figura 4.6 - Vista en 3D de Arreglo AS3 en CYMGRD para una Estructura Auto Soportada con Resistividad Entre 301 y 500 Ω -m

Resultados de simulación, resistividad de suelo: 500 Ω -m:

Tipo de Terreno	Profundidad (m)	Resistencia de Red de Tierra (Ω)
Rocoso	0.4	10.5442
No Cultivable	0.8	10.2477
Cultivable	1.5	9.9078

Tabla 4.3 - Resultados Para Simulación en CYMGRD Para Resistividad de Suelo de 500 Ω -m

Caso 4, arreglo AS4. Resistividad 501 a 750 Ω -m, vista de planta:

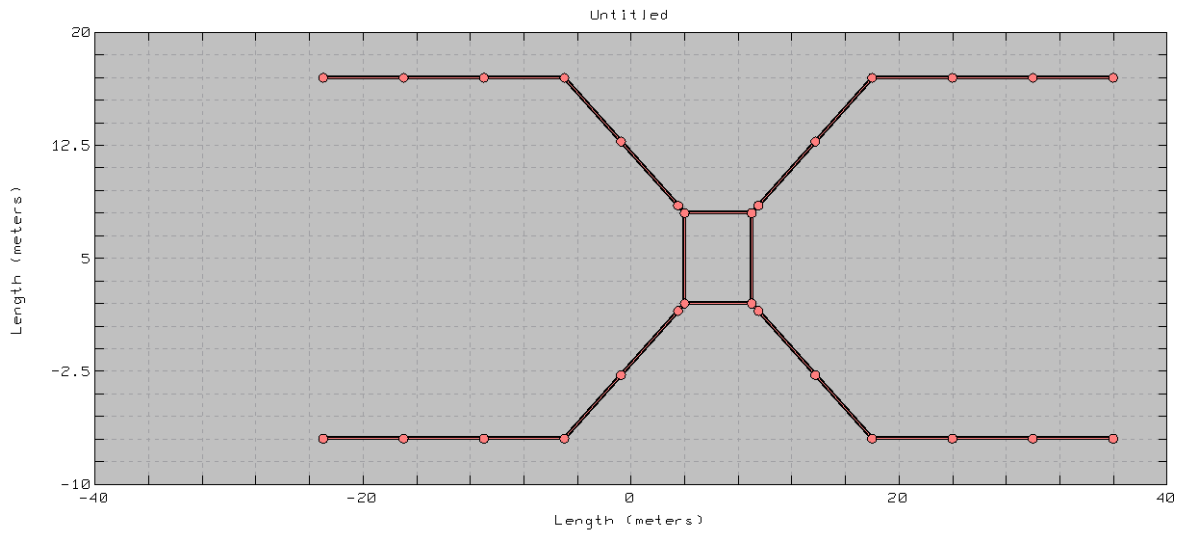


Figura 4.7 - Vista en Planta de Arreglo AS4 en CYMGRD para una Estructura Auto Soportada en un Terreno Con Resistividad Entre 501 y 750 Ω -m

Vista en 3D:

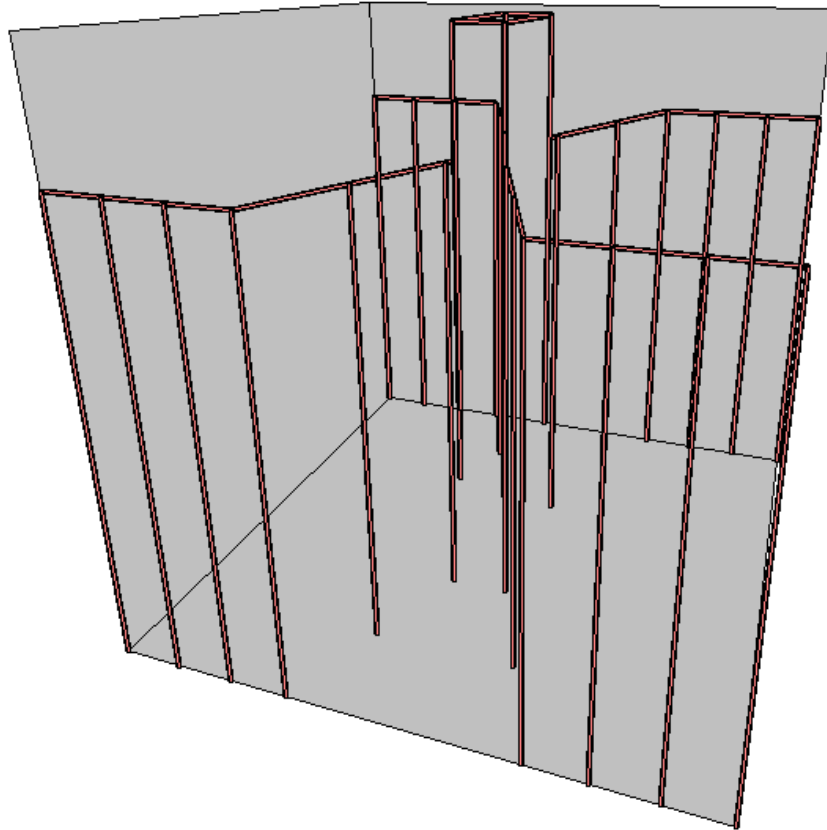


Figura 4.8 - Vista en 3D de Arreglo AS4 en CYMGRD para una Estructura Auto Soportada en un Terreno Con Resistividad Entre 501 y 750 Ω -m

Resultados de simulación, resistividad de suelo: 750 Ω -m:

Tipo de Terreno	Profundidad (m)	Resistencia de Red de Tierra (Ω)
Rocoso	0.4	11.6753
No Cultivable	0.8	11.3217
Cultivable	1.5	10.9404

Tabla 4.4 - Resultados Para Simulación en CYMGRD Para Resistividad de Suelo de 750 Ω -m

Caso 5, arreglo AS5. Resistividad 750 Ω -m en adelante, vista de planta:

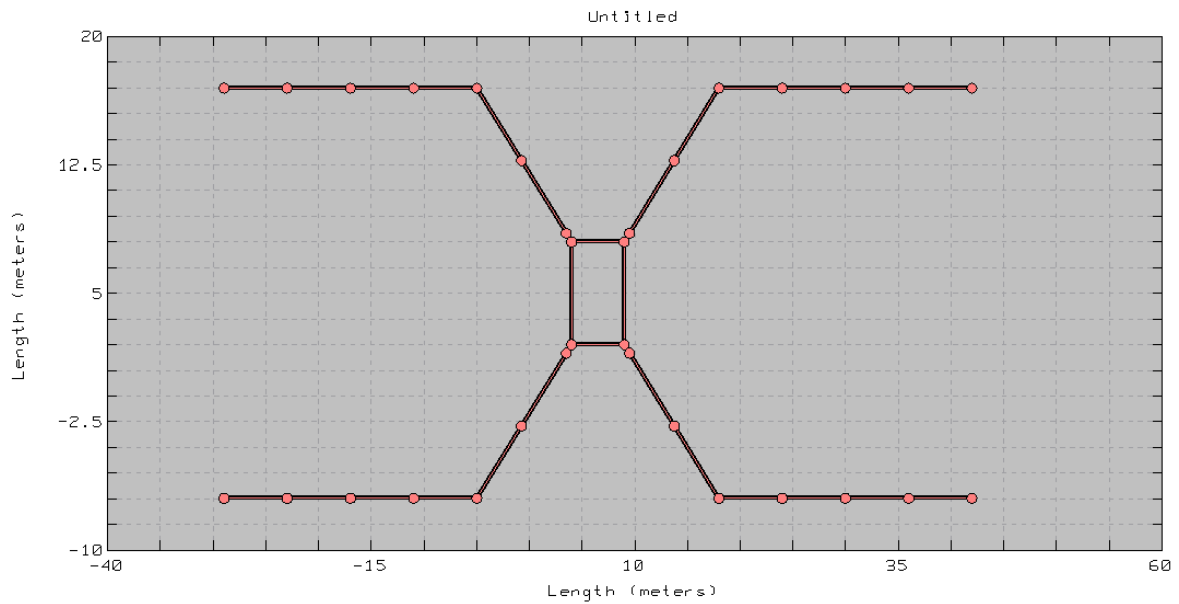


Figura 4.9 - Vista en Planta de Arreglo AS5 en CYMGRD para una Estructura Auto Soportada en un Terreno Con Resistividad Mayor a 750 Ω -m

Vista en 3D:

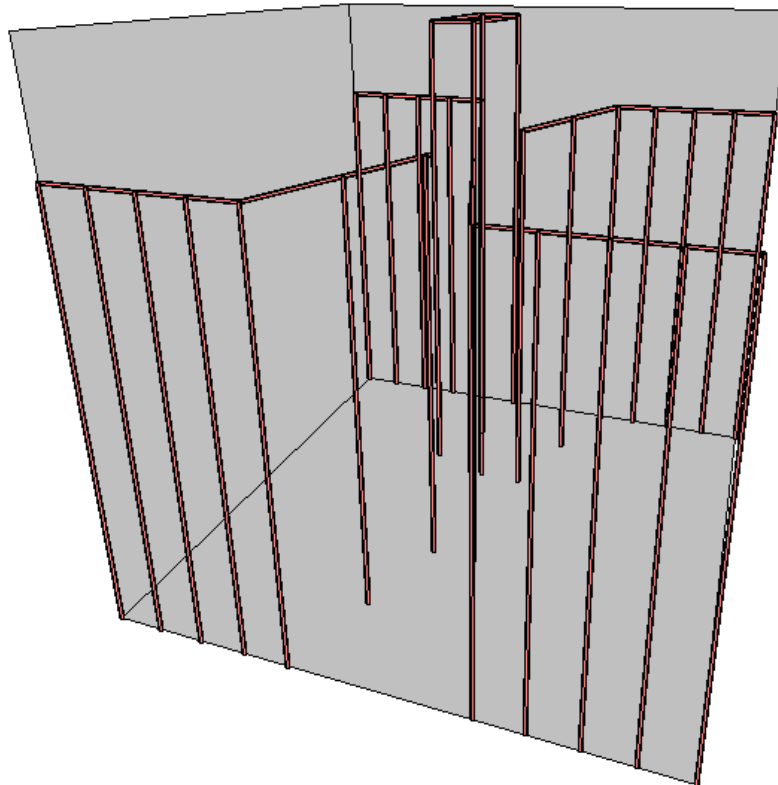


Figura 4.10 - Vista en 3D de Arreglo AS5 en CYMGRD para una Estructura Auto Soportada en un Terreno Con Resistividad Mayor a 750 Ω -m

Resultados de simulación, debido a que no existe un límite superior definido para este intervalo (como si sucede en los demás casos), se decide simular con un valor alto de resistividad de suelo, el cual será de 1000 Ω -m:

Tipo de Terreno	Profundidad (m)	Resistencia de Red de Tierra (Ω)
Rocoso	0.4	13.7510
No Cultivable	0.8	13.3425
Cultivable	1.5	12.9043

Tabla 4.5 - Resultados Para Simulación en CYMGRD Para Resistividad de Suelo de 1000 Ω -m

Nota: Para los casos con terrenos con una resistividad mayor a 750 Ω , se permiten valores mayores a 10 Ω de resistencia de red de tierra ya que el criterio de aceptación será de la construcción del arreglo presentado.

4.2.2 Postes Troncónicos

Como modelo base para todas las simulaciones, se toma una estructura de un solo poste donde la única conexión a tierra será la bajante del poste. Los arreglos se colocan paralelos al sentido de transmisión de la línea.

Caso 1, Arreglo PT1. Resistividad 1 a 300 Ω -m, vista de planta:

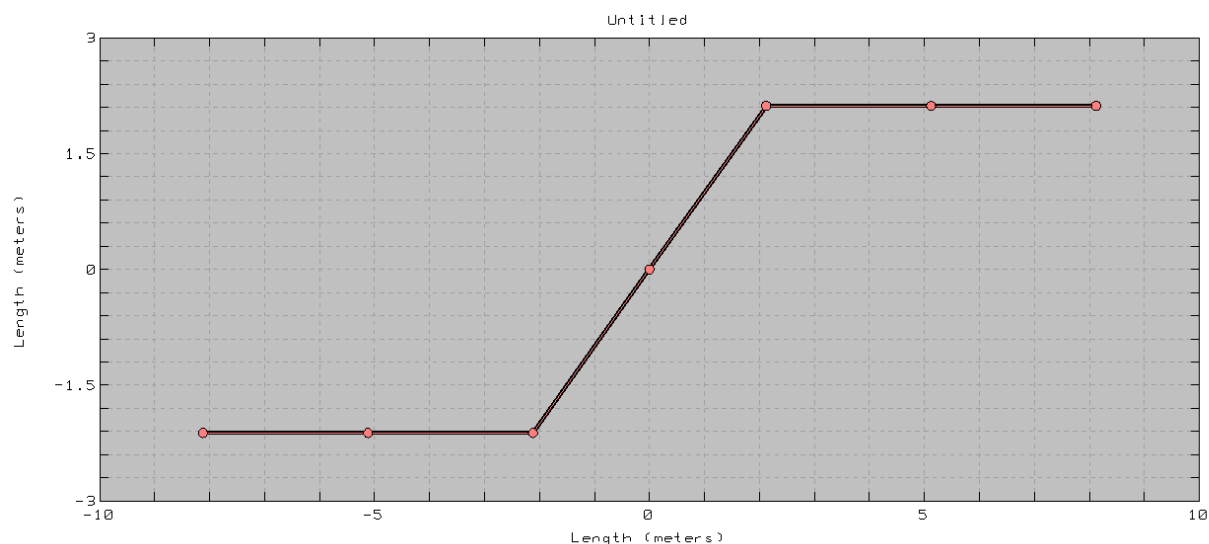


Figura 4.11 - Vista en Planta de Arreglo PT1 en CYMGRD Para un Poste en un Terreno Con Resistividad Entre 1 y 300 Ω -m

Vista 3D:

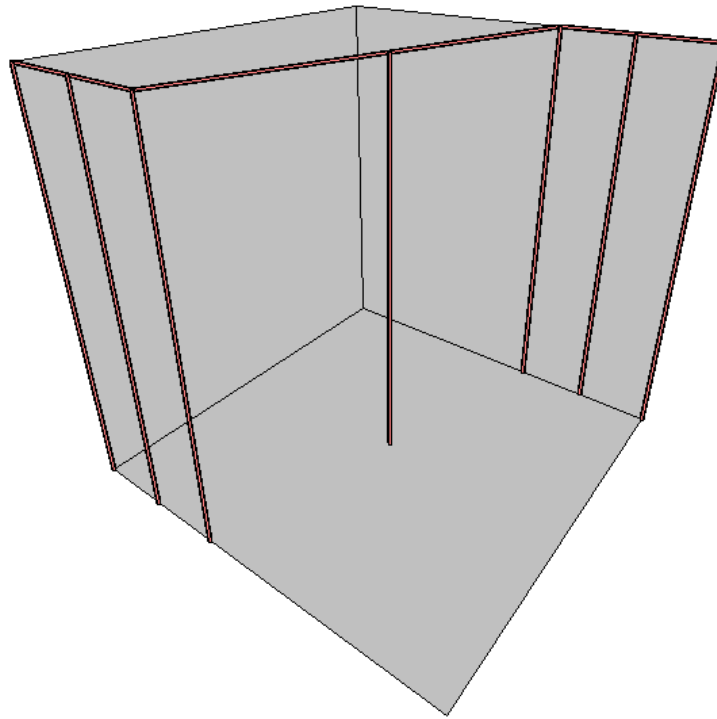


Figura 4.12 - Vista en 3D de Arreglo PT1 en CYMGRD Para un Poste en un Terreno Con Resistividad Entre 1 y 300 Ω -m

Resultados de simulación, resistividad de suelo: 300 Ω -m:

Tipo de Terreno	Profundidad (m)	Resistencia de Red de Tierra (Ω)
Rocoso	0.4	17.3120
No Cultivable	0.8	16.6139
Cultivable	1.5	15.8497

Tabla 4.6- Resultados Para Simulación en CYMGRD de Arreglo PT2 Para Resistividad de Suelo de 300 Ω -m

Caso 2, arreglo PT2. Resistividad 301 a 500 Ω -m, vista de planta:

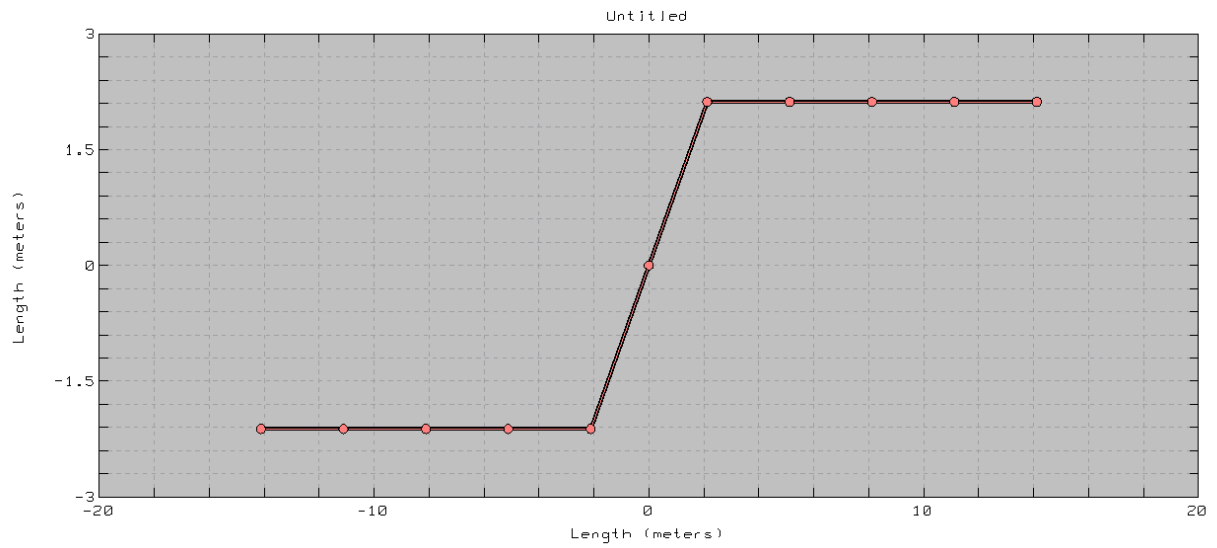


Figura 4.13 - Vista en Planta de Arreglo PT2 en CYMGRD Para un Poste en un Terreno Con Resistividad Entre 301 y 500 Ω -m

Vista 3D:

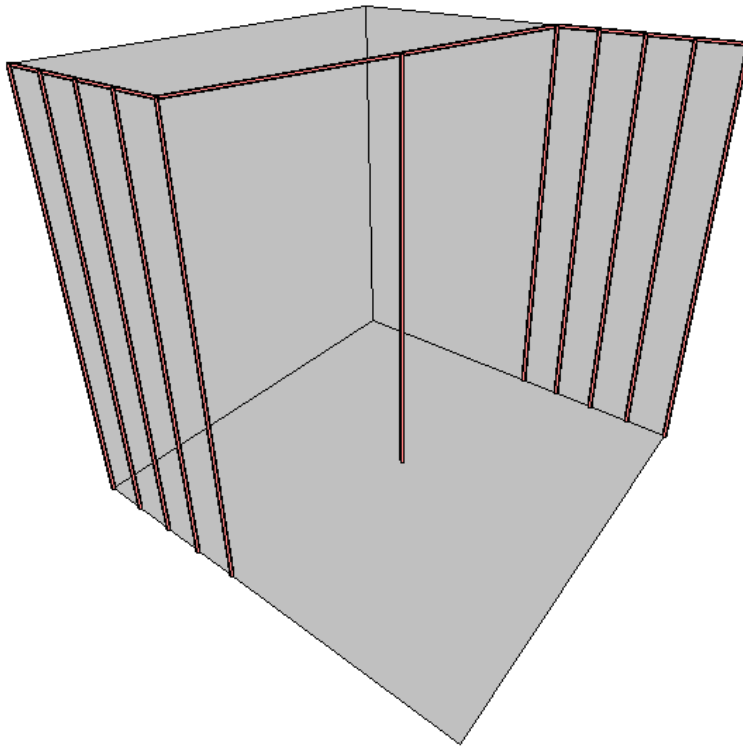


Figura 4.14 - Vista en 3D de Arreglo PT2 en CYMGRD Para un Poste en un Terreno Con Resistividad Entre 301 y 500 Ω -m

Resultados de simulación, resistividad de suelo: 500 Ω -m:

Tipo de Terreno	Profundidad (m)	Resistencia de Red de Tierra (Ω)
Rocoso	0.4	20.2049
No Cultivable	0.8	19.4375
Cultivable	1.5	18.5852

Tabla 4.7 - Resultados Para Simulación en CYMGRD de Arreglo PT2 para Resistividad de Suelo de 500 Ω -m

Caso 3, arreglo PT3. Resistividad 501 Ω -m en adelante, vista de planta:

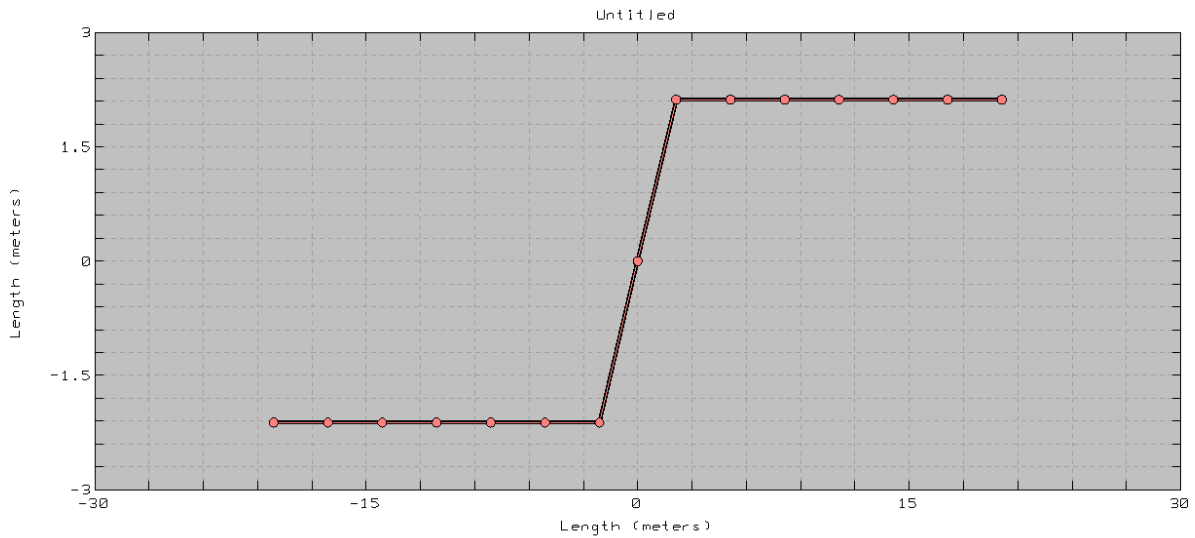


Figura 4.15 -Vista en Planta de Arreglo PT3 en CYMGRD Para un Poste en un Terreno Con Resistividad Mayor a 501 Ω -m

Vista 3D:

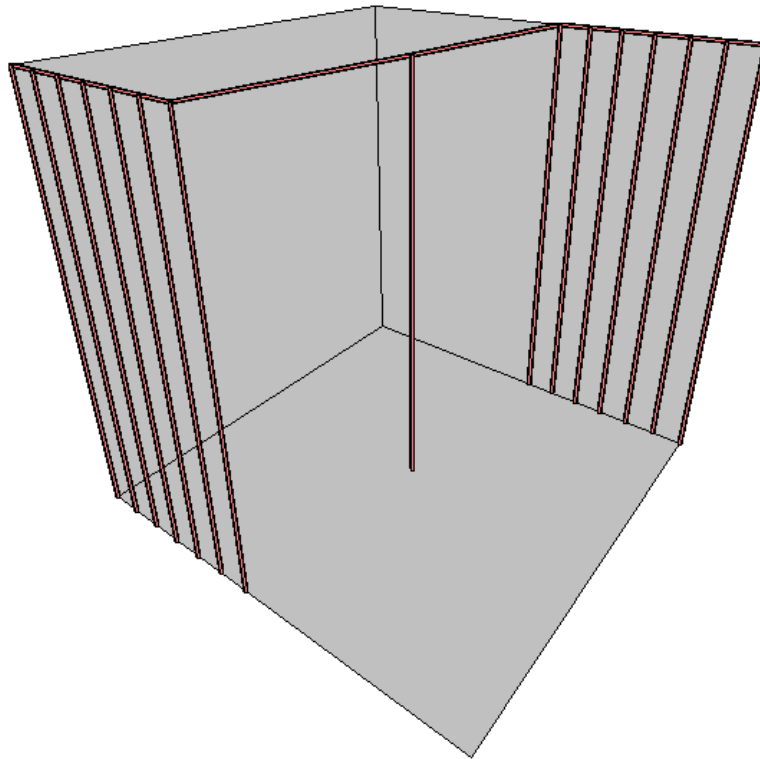


Figura 4.16 - Vista en 3D de Arreglo PT3 en CYMGRD Para un Poste en un Terreno Con Resistividad Mayor a 501 Ω -m

Resultados de simulación, resistividad de suelo: 1000 Ω -m:

Tipo de Terreno	Profundidad (m)	Resistencia de Red de Tierra (Ω)
Rocoso	0.4	31.5197
No Cultivable	0.8	30.3759
Cultivable	1.5	29.0967

Tabla 4.8 - Resultados Para Simulación en CYMGRD Para Resistividad de Suelo de 1000 Ω -m

Nota: Para los casos con terrenos con una resistividad mayor a 501 Ω , se permiten valores mayores a 20 Ω de resistencia de red de tierra ya que el criterio de aceptación será la construcción del arreglo presentado.

Capítulo 5 - Cálculo y Reporte, Diseño de Redes de Tierra

5.1 Cálculo de Resistencia de Tierra

A pesar de que durante el proceso de diseño o instalación no es un procedimiento común el realizar cálculos analíticos, sí es recomendado llevarlos a cabo para poder validar el cumplimiento de los criterios de aceptación para una puesta a tierra efectiva.

Los arreglos de puesta a tierra propuestos en el Capítulo 3 simplifican de gran manera el proceso de diseño debido a que han sido sujetos previamente a un proceso de validación en base a los criterios de aceptación y el siguiente modelo de cálculo. Es muy importante notar que los cálculos presentados a continuación (de igual manera que los arreglos presentados anteriormente) están basados en modelos de suelo uniforme, basados en la resistividad recomendada de diseño.

En el proceso de análisis se toman en cuenta los dos elementos que conforman los arreglos (electrodos verticales y contra-antenas), junto al efecto de la profundidad de enterramiento y la resistencia mutua entre todos los elementos del arreglo.

La resistencia de un electrodo vertical, está dada por [9]:

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \left(\frac{2l_{ev}}{r_{ev}} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r_{ev}}{2l_{ev}} \right)^2} \right) + \frac{r_{ev}}{2l_{ev}} - \sqrt{1 + \left(\frac{r_{ev}}{2l_{ev}} \right)^2} \right) \right) \quad (11)$$

$$\cong \frac{\rho}{2\pi l_{ev}} \left(\ln \left(\frac{4l_{ev}}{r_{ev}} \right) - 1 \right), \text{ si } l_{ev} \gg r_{ev} \quad (12)$$

Donde:

ρ = Resistividad recomendada de diseño [Ω -m]

l_{ev} = Longitud del electrodo vertical [m]

r_{ev} = Radio del electrodo vertical [m]

Al tener múltiples electrodos verticales en una línea recta, la corriente no es la misma en todos ellos; sin embargo, es posible asumir que la corriente entre todos ellos sí es la misma y poder tener resultados precisos usando [9]:

$$R_{vt} = \frac{1}{n} \left(R_v + \frac{\rho}{2\pi r_{ev}} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \right] \right) \quad (13)$$

Donde:

p = Resistividad recomendada de diseño [Ω -m]

r_{ev} = Radio del electrodo vertical

n = Número de electrodos

R_v = Resistencia de un electrodo vertical

(12) es una ecuación simplificada que se deriva de (11), sin embargo, si se tienen múltiples electrodos verticales los cuales su separación es igual o menor a la longitud de los electrodos, se recomienda usar (11) para el análisis del arreglo de red a tierra, ya que se tendrán valores más certeros [9].

Debido a que las patas de las estructuras autosoportadas están embebidas en concreto y a fin de calcular su resistencia y efecto en el arreglo de la red de puesta a tierra, se modelan como electrodos embebidos en concreto. Estos electrodos se asumen bajo los siguientes parámetros [5]:

- Varillas de longitud: 3 metros
- Diámetro de conductor: 0.2 metros
- Diámetro de envolvente de concreto: 0.7 metros
- Resistividad del concreto: 100 Ω -m

La resistencia de un electrodo embebido en concreto se obtiene de:

$$R_{cn} = \frac{1}{2\pi l_{en}} \left(\rho_c \ln \left(\frac{D_c}{d_e} \right) + \rho \ln \left(\frac{8l_{en}}{D_c} \right) - 1 \right) \quad (14)$$

Donde:

l_{en} = Profundidad del concreto enterrado/longitud de varilla modelada [m]

ρ_c = Resistividad del concreto [Ω -m]

D_c = Diámetro de la envolvente de concreto [m]

d_e = Diámetro del conductor equivalente embebido en el concreto [m]

ρ = Resistividad del terreno [Ω -m]

Con los parámetros especificados para el modelo, es posible simplificar (14) en:

$$R_{cn} = \frac{1}{6\pi} (125.3 + 2.53\rho) \quad (15)$$

La resistencia de una contra-antena completamente enterrada viene dada por [9]:

$$R_{ca} = \frac{\rho}{2\pi l_{eh}} \left[\ln \left(\frac{2l_{eh}}{\sqrt{2r_{eh}d}} \right) - 1 \right], \text{ si } d \ll l_{eh} \quad (16)$$

Donde:

ρ = Resistividad recomendada de diseño [Ω -m]

r_{eh} = Radio de contra-antena [m]

l_{eh} = Longitud de la contra-antena [m]

d = Profundidad de enterramiento [m]

Al tener dos contra-antenas paralelas, su resistencia mutua es [9]:

$$R_{m-ca} = \frac{\rho}{2\pi l_{eh}} \left(\ln \left(\frac{2l_{eh}}{a_{12}} \right) + \ln \left(\frac{2l_{eh}}{a'_{12}} \right) - 2 \right)$$

$$R_{m-ca} = \frac{\rho}{\pi l_{eh}} \left(\ln \left(\frac{2l_{eh}}{\sqrt{a_{12}a'_{12}}} \right) - 1 \right) \quad (17)$$

Donde:

ρ = Resistividad recomendada de diseño [Ω -m]

l_{eh} = Longitud de la contra-antena [m]

a_{12} = Separación entre contra-antenas [m]

a'_{12} = Distancia de una contra-antena a la imagen de la otra [m]

El numerador del argumento del logaritmo en (17), es la distancia de un conductor a la imagen del otro, que es:

$$a'_{12} = \sqrt{4d^2 + a_{12}^2} \quad (18)$$

Donde:

d = Profundidad de enterramiento [m]

a_{12} = Separación entre contra-antenas [m]

Es igualmente posible poseer elementos radiales con un punto en común, a pesar de que exista el caso particular en el que al tener dos elementos radiales pueda a simple vista ser una sola contra-antena (y por lo tanto analizarlo como un elemento conjunto) esto sería un error, debido a los puntos de interconexión entre los elementos. La resistencia de un arreglo radial completamente enterrado es [9]:

$$R_r = \frac{\rho}{n\pi l_{er}} \left[\ln \left(\frac{2l_{er}}{2r_{er}d} \right) - 1 + N(n) \right] \quad (19)$$

Donde:

d = Profundidad de enterramiento [m]

l_{er} = Longitud elemento radial [m]

r_{er} = Radio elemento radial [m]

Y $N(n)$ sea:

$$N(n) = \sum_{m=1}^{n-1} \ln \left(\frac{1 + \sin \left(\frac{\pi m}{n} \right)}{\sin \left(\frac{\pi m}{n} \right)} \right) \approx (n-1) \ln(2 * 1.707) - \ln(n) \quad (20)$$

Al asumir que la longitud de las contra-antenas es mucho mayor que la longitud de los electrodos, se tiene que el potencial cambia de forma logarítmica con la separación, y la resistencia mutua entre una contra-antena y los electrodos conectados a ella se obtiene de [9]:

$$R_{m-hv} = \frac{\rho}{\pi l_{eh}} \ln \left(\frac{2l_{eh}}{l_{ev}} \right) \quad (21)$$

Donde:

ρ = Resistividad recomendada de diseño [Ω -m]

l_{eh} = Longitud de la contra-antena [m]

l_{ev} = Longitud del electrodo vertical [m]

El valor de la resistencia combinada entre arreglos de contra-antenas y electrodos verticales se calcula a partir de:

$$R = \frac{R_{vt}R_{ht} - R_{m-hv}^2}{R_{vt} + R_{ht} - 2R_{m-hv}} \quad (22)$$

Donde:

R_{vt} = Resistencia combinada de electrodos verticales [Ω]

R_{ht} = Resistencia combinada de contra-antenas [Ω]

R_{m-hv} = Resistencia mutua entre contra-antenas y electrodos verticales [Ω]

La fórmula anterior es válida directamente para los arreglos de postes troncónicos debido a su disposición geométrica simple. Para las estructuras autosoportadas, se necesitan obtener los equivalentes de dos contra-antenas en paralelo considerando la resistencia mutua entre ambas contra-antenas, por medio de:

$$R_{ca-p} = \frac{R_{ca}^2 - R_{m-ca}^2}{2R_{ca} - 2R_{m-ca}} \quad (23)$$

Finalmente, el valor de resistencia equivalente del arreglo de red de tierra para estructuras autosoportadas se obtiene con:

$$R = \frac{\frac{R_{ca-p}}{2} R_{cn} - R_{m-hv}^2}{\frac{R_{ca-p}}{2} + R_{cn} - 2R_{m-hv}} \quad (24)$$

Donde para R_{m-hv} , se obtiene de los parámetros para el modelo de las fundaciones de la estructura autosoportadas. En caso de que los electrodos verticales que se usen en la red de puesta a tierra, la resistencia mutua entre contra-antenas y varillas y la resistencia mutua entre las fundaciones y el arreglo de la red de puesta a tierra, serán iguales.

Las ecuaciones presentadas anteriormente pueden ser utilizadas para la validación analítica de los arreglos presentados en el Capítulo 2 y sus valores de resistencia de la puesta a tierra, ya sea para postes troncocónicos o para estructuras autosoportadas. Cabe notar que puede que exista algún error al comparar con los valores finales de resistencia del arreglo obtenidos por medición, ya que las condiciones de cada suelo y la simplificación para un modelo de una capa (cuando en la práctica el perfil de resistividad del suelo puede ser más complejo) sumado a la geometría compleja de los arreglos (especialmente para el caso de las estructuras autosoportadas), sin embargo, es posible obtener valores con aproximaciones aceptables para el análisis y el proceso de diseño.

Luego de conocer los 3 parámetros explicados en el Capítulo 2, el proceso de cálculo para ambos tipos de arreglo se realiza de la siguiente forma:

Estructuras autosoportadas:

- a. Especificar el valor de resistividad recomendada de diseño del suelo, la profundidad del arreglo y el tipo de arreglo a usar
- b. Usar (12), para calcular el valor de la resistencia de una varilla de tierra
 - i. Nota: Debido a que la separación de los electrodos en los arreglos para postes troncocónicos es 2 veces su longitud, es posible el uso de (12) en el proceso de cálculos debido a que brinda una mejor aproximación en los resultados finales.
- c. Usar (13), para calcular el valor de la resistencia combinada de todas las varillas de tierra del arreglo
- d. Usar (16), para calcular el valor de la resistencia a tierra de la contra-antena del arreglo
- e. Usar (17) y (18) para calcular el valor de la resistencia equivalente de las contra-antenas, al tener dos elementos en paralelo
- f. Usar (21), para calcular el valor de la resistencia mutua entre las varillas y contra-antena

- g. Usar (15) para calcular la resistencia de las fundaciones de la estructura auto-soportada según el modelo propuesto
- h. Usar (23) para calcular un equivalente de las varillas y contra-antenas paralelas
- i. Finalmente, usar (21) y (24) para obtener el valor de resistencia equivalente de todo el arreglo de la red de tierra

Postes tronónicos:

- a. Especificar el valor de resistividad recomendada de diseño del suelo, la profundidad del arreglo y el tipo de arreglo a usar
- b. Usar (11), para calcular el valor de la resistencia de una varilla de tierra
 - i. Nota: Debido a que la separación de los electrodos en los arreglos para postes tronónicos es igual a su longitud, se precisa usar (11) en vez de (12) para obtener mejores resultados.
- c. Usar (19), para calcular el valor de la resistencia combinada de los dos elementos radiales
- d. Usar (16) para calcular el valor de la resistencia a tierra de las contra-antenas del arreglo
- e. Usar (13), para calcular el valor de la resistencia combinada de todas las varillas de tierra del arreglo
- f. Usar (21), para calcular el valor de la resistencia mutua entre las varillas y la contra-antena
- g. Usar (22) para obtener el valor de resistencia equivalente de las contra-antenas y las varillas de tierra
- h. Usar (17) y (18) para calcular el valor de la resistencia equivalente de las dos contra-antenas
- i. Finalmente usar (22), para calcular el valor de la resistencia equivalente del arreglo usando el valor obtenido en h. y el valor de la resistencia combinada de los elementos radiales

Para la simplificación del proceso de cálculo, se ha diseñado e implementado una herramienta de cálculo que permite reducir la cantidad de esfuerzo necesario para la obtención de un valor de resistencia equivalente para los arreglos, la cual se muestra a continuación.

5.2 CPAR - Herramienta de Cálculo de Resistencia de Puesta a Tierra

En las ecuaciones presentadas, es apreciable que todos sus parámetros iniciales son obtenidos de forma sencilla, ya que están escritas en función de la resistividad del suelo (la cual es obtenida como uno de los primeros pasos en el proceso de diseño), la profundidad del arreglo (igualmente obtenida en los primeros pasos al analizar el tipo de suelo donde se construye la estructura de la línea de transmisión/subtransmisión) y la longitud de las varillas y contra-antenas (que se obtienen directamente del tipo de arreglo usado y de las especificaciones de los materiales) pero que el proceso de cálculo puede llegar a representar una inversión significativa de tiempo. Por lo tanto, se vuelve relevante obtener un recurso adicional para la simplificación del proceso, reduciendo cualquier error humano que pudiera ser introducido en los cálculos manuales, fuesen hechos o no por software y ayudando a simplificar el proceso de diseño y validación.

Este recurso es llamado CPAR, y es un programa en Python el cual permite completar todos los pasos mencionados anteriormente en cuestión de segundos; y que de la misma manera integra una opción de selección para postes troncoónicos o estructuras auto soportadas. Este código/herramienta es posible ejecutarlo por medio de un archivo ejecutable .exe en computadoras con sistema operativo Windows, o de igual manera en un entorno Python local, no es posible usarlo en un compilador en línea debido a que el programa tiene una interfaz gráfica, la cual no es posible que sea ejecutada en línea.

Como parte de su funcionalidad, CPAR en su ejecución también puede generar un archivo .txt que sirve a modo de reporte del diseño de la red de puesta a tierra, en el cual se pueden encontrar diversos valores característicos del diseño; en función de la resistividad del suelo y del tipo de terreno en donde se localizará el arreglo.

La ejecución de CPAR se lleva a cabo como cualquier otro archivo ejecutable, el cual abre la siguiente interfaz gráfica:

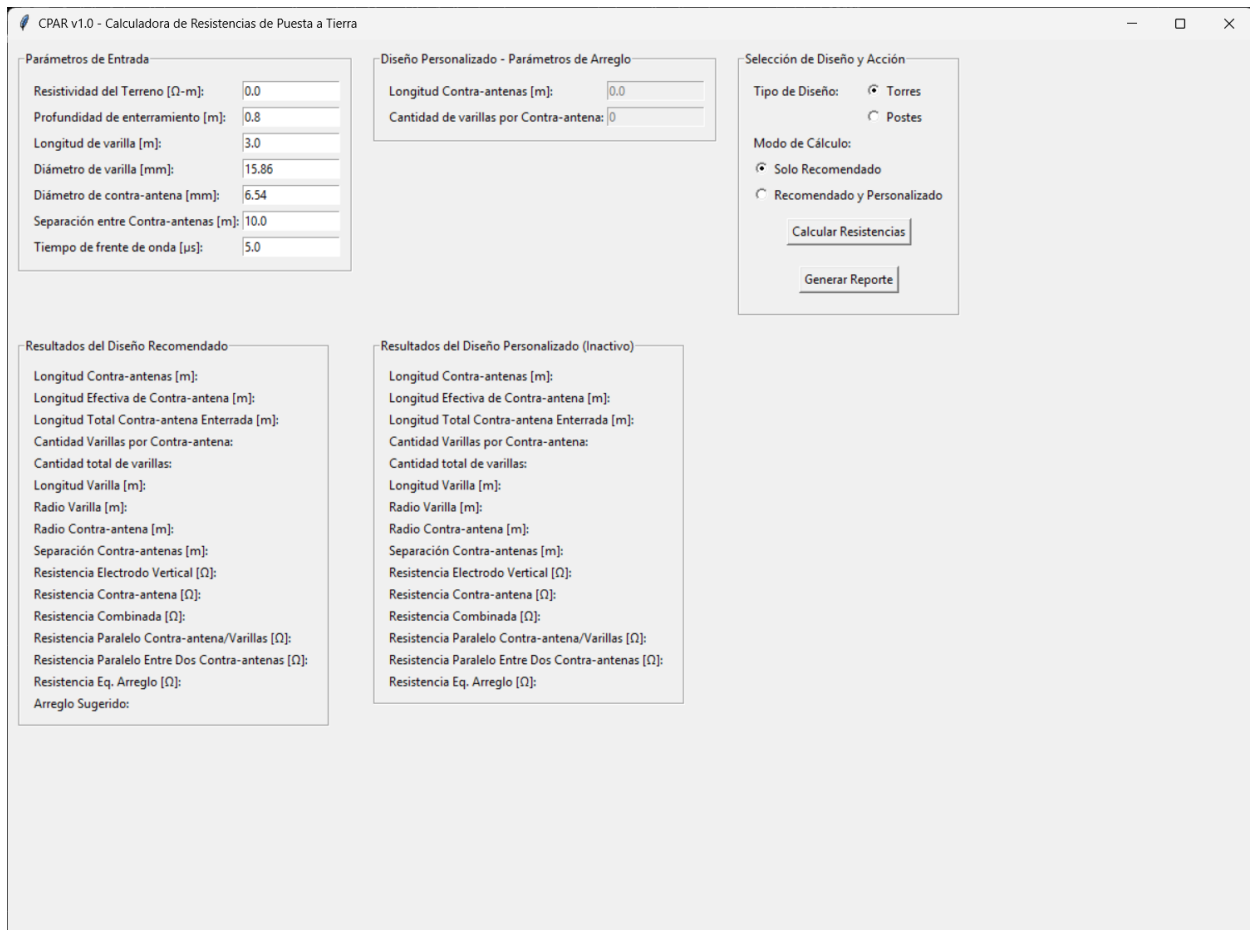


Figura 5.1 - Ventana de Ejecución CPAR

La interfaz gráfica de CPAR posee campos donde es posible configurar diversos parámetros del arreglo de la red de puesta a tierra de forma libre, los cuales son:

- Resistividad del terreno [Ω -m]
- Profundidad de enterramiento del arreglo [m]
- Longitud de varilla [m]
- Diámetro de varilla [mm]
- Diámetro de contra-antena [mm]
- Separación de contra-antenas [m]
- Tiempo de frente de onda [μ s]

Todos estos parámetros a excepción de la resistividad del terreno poseen valores por defecto provenientes de las especificaciones de los arreglos del Capítulo 2, sin embargo, es posible modificarlos a discreción del usuario. Los resultados son visualizados en la mitad inferior de la ventana de la interfaz gráfica, donde se muestra entre otros valores

intermedios y especificaciones, la resistencia equivalente del arreglo (en ohm) y el código del arreglo recomendado según los criterios anteriormente abordados en el Capítulo 2. Para realizar los cálculos y visualizar resultados, basta con introducir la resistividad y hacer clic en “Calcular Resistencias”.

CPAR tiene además dos funciones extra, las cuales son de ejecutar un diseño completamente personalizado y de generar un reporte de diseño con los parámetros ingresados. El diseño personalizado permite igualmente realizar cálculos con los parámetros por defecto o modificados según sea el caso, y también modificar la cantidad de varillas a usar por contra-antenas y la longitud de las mismas sin ninguna restricción (exceptuando que el valor ingresado debe ser positivo en ambos campos). Esto brinda libertad al diseñador/validador/estudiante para poder evaluar a mayor profundidad y detalle diseños propios o el efecto de reducir/aumentar la longitud de las contra-antenas usadas y la cantidad de varillas. Sin importar la cantidad de varillas a usar o la longitud de contra-antenas, siempre se usa la misma disposición geométrica para los diseños personalizados, es decir, las contra-antenas siempre serán 4 para las estructuras autosoportadas y 2 para los postes troncocónicos.

Como parte de buenas prácticas para el diseño de redes de tierra, se incluye también el cálculo de la longitud efectiva de la contra-antena a usarse con el fin de garantizar que en el evento de una descarga atmosférica, el arreglo sea verdaderamente efectivo al momento de realizar la descarga de corriente por medio de los conductores usados. Ya que en los diseños recomendados se tienen longitudes predeterminadas, está garantizado que estas longitudes de contra-antenas cumplan el criterio de que la longitud total de cada contra-antena sea menor a su longitud efectiva, sin embargo, existe la posibilidad de que en el diseño personalizado se pueda ingresar un valor de longitud de contra-antena mayor a la longitud efectiva. Si este caso sucede, CPAR mostrará un error que pedirá revisar el diseño debido a la violación del criterio. El valor por defecto para el análisis de la longitud efectiva será de un frente de onda de $5\mu\text{s}$, pero este puede ser modificado a voluntad del usuario.

Es posible analizar otros arreglos geométricos con las ecuaciones previamente abordadas, sin embargo, eso no es parte del alcance de CPAR, el cual es brindar una solución rápida y práctica de análisis de los arreglos anteriormente propuestos.

Para validar un diseño personalizado, basta con seleccionar la opción “Recomendado y Personalizado” para poder ingresar los valores deseados de longitud de contra-antena y la cantidad de varillas a validar. CPAR tomará los mismos parámetros mostrados a la izquierda para realizar los cálculos de validación de los arreglos recomendados y personalizados. Es decir, si se selecciona la opción de realizar los cálculos para ambos

arreglos y no se actualizan los parámetros de sus valores por defecto, tanto la validación para el diseño recomendado y el personalizado serán en base a varillas de 3 metros de longitud, con varillas de 15.86 milímetros de diámetro y contra-antenas calibre #2 AWG (6.54 milímetros de diámetro). Se muestra a continuación la ventana de CPAR con la opción del diseño personalizado y con parámetros ingresados:

CPAR v1.0 - Calculadora de Resistencias de Puesta a Tierra

Parámetros de Entrada

Resistividad del Terreno [Ω -m]: 150
 Profundidad de enterramiento [m]: 0.8
 Longitud de varilla [m]: 3.0
 Diámetro de varilla [mm]: 15.86
 Diámetro de contra-antena [mm]: 6.54
 Separación entre Contra-antenas [m]: 10.0
 Tiempo de frente de onda [μ s]: 5.0

Diseño Personalizado - Parámetros de Arreglo

Longitud Contra-antenas [m]: 8
 Cantidad de varillas por Contra-antena: 2

Selección de Diseño y Acción

Tipo de Diseño: Torres
 Postes

Modo de Cálculo:
 Solo Recomendado
 Recomendado y Personalizado

Calcular Resistencias
 Generar Reporte

Resultados del Diseño Recomendado

Longitud Contra-antenas [m]:	12.00
Longitud Efectiva de Contra-antena [m]:	50.66
Longitud Total Contra-antena Enterrada [m]:	48.00
Cantidad Varillas por Contra-antena:	3
Cantidad total de varillas:	12
Longitud Varilla [m]:	3.00
Radio Varilla [m]:	0.01
Radio Contra-antena [m]:	0.00
Separación Contra-antenas [m]:	10.00
Resistencia Electrodo Vertical [Ω]:	1689.27
Resistencia Contra-antena [Ω]:	19.12
Resistencia Combinada [Ω]:	1689.27
Resistencia Paralelo Contra-antena/Varillas [Ω]:	19.05
Resistencia Paralelo Entre Dos Contra-antenas [Ω]:	9.26
Resistencia Eq. Arreglo [Ω]:	3.74
Arreglo Sugerido:	AS2

Resultados del Diseño Personalizado

Longitud Contra-antenas [m]:	8.00
Longitud Efectiva de Contra-antena [m]:	50.66
Longitud Total Contra-antena Enterrada [m]:	32.00
Cantidad Varillas por Contra-antena:	2
Cantidad total de varillas:	8
Longitud Varilla [m]:	3.00
Radio Varilla [m]:	0.01
Radio Contra-antena [m]:	0.00
Separación Contra-antenas [m]:	10.00
Resistencia Electrodo Vertical [Ω]:	1530.40
Resistencia Contra-antena [Ω]:	26.26
Resistencia Combinada [Ω]:	1530.40
Resistencia Paralelo Contra-antena/Varillas [Ω]:	26.08
Resistencia Paralelo Entre Dos Contra-antenas [Ω]:	11.44
Resistencia Eq. Arreglo [Ω]:	4.26

Figura 5.2 - Interfaz Gráfica de CPAR - Cálculos Personalizados

Al hacer clic en “Generar Reporte”, CPAR generará un archivo .txt donde será posible visualizar todos los resultados mostrados en la ventana de la interfaz gráfica a forma de resumen del diseño. Si se ha seleccionado la opción de validar un diseño personalizado y el recomendado, se mostrarán los resultados de ambos diseños; y en caso se haya seleccionado solo el diseño recomendado se tendrán solo los valores del diseño recomendado. El archivo .txt generado es una descripción completa de los parámetros de la red de puesta a tierra que se está analizando.

```
Reporte de Diseño - CPAR.txt
File Edit View H1 I B I A
--- Reporte de Cálculo de Red de Puesta a Tierra / CPAR v1.0 ---
Diseño realizado para: Torres
Resistividad del Terreno: 150.00 [Ω-m]
Tiempo de frente de onda: 5.00 [μs]
Profundidad de enterramiento: 0.8 [m]

--- Resultados del Diseño Definido por el Usuario ---
Longitud Contra-antenas: 8.00 [m]
Longitud Efectiva de Contra-antena: 50.66 [m]
Longitud Total Contra-antena Enterrada: 32.00 [m]
Cantidad Electrodo Verticales Usados por Contra-antena: 2
Cantidad Total de Varillas: 8
Longitud Varilla: 3.00 [m]
Radio Varilla: 0.01 [m]
Radio Contra-antena: 0.00 [m]
Separación entre Contra-antenas: 10.00 [m]
Resistencia de Electrodo Verticales: 1530.40 [Ω]
Resistencia de Contra-antena: 26.26 [Ω]
Resistencia Equivalente Entre Una Contra-antena y sus Varillas: 26.08 [Ω]
Resistencia Paralelo Entre Dos Contra-antenas: 11.44 [Ω]
Resistencia de Varilla Embebida en Concreto: 26.78 [Ω]
Resistencia Equivalente del Arreglo: 4.26 [Ω]

--- Resultados del Diseño Recomendado ---
Longitud Contra-antenas: 12.00 [m]
Longitud Efectiva de Contra-antena: 50.66 [m]
Longitud Total Contra-antena Enterrada: 48.00 [m]
Cantidad Electrodo Verticales Usados por Contra-antena: 3
Cantidad Total de Varillas: 12
Longitud Varilla: 3.00 [m]
Radio Varilla: 0.01 [m]
Radio Contra-antena: 0.00 [m]
Separación entre Contra-antenas: 10.00 [m]
Resistencia de Electrodo Verticales: 1689.27 [Ω]
Resistencia de Contra-antena: 19.12 [Ω]
Resistencia Equivalente Entre Una Contra-antena y sus Varillas: 19.05 [Ω]
Resistencia Paralelo Entre Dos Contra-antenas: 9.26 [Ω]
Resistencia de Varilla Embebida en Concreto: 26.78 [Ω]
Resistencia Equivalente del Arreglo: 3.74 [Ω]
Arreglo Sugerido: AS2

-----
Ln 1, Col 1 | 1,670 characters | Plain text | 100% | Windows (CRLF) | UTF-8
```

Figura 5.3 - Reporte de Cálculo CPAR - Diseño Recomendado y Diseño Personalizado

5.2.1 Validación - Estructuras auto soportadas

Se observa en el siguiente gráfico que los porcentajes de error son aceptables ya que estos no superan un 25% salvo un valor atípico para los arreglos a 1.5m de profundidad. Las gráficas del comportamiento de CPAR vs CYMGRD para las estructuras auto soportadas muestran que los valores calculados serán menores a los valores de simulación en la mayoría de casos, exceptuando el escenario de profundidad de enterramiento igual a 0.4m, donde los valores de CPAR serán de hecho mayores a los valores obtenidos por medio de simulación. Se observa también que a medida los arreglos están a mayor profundidad y/o se encuentran en suelos de mayor resistividad, la correlación de valores entre CPAR y CYMGRD aumenta; y se observa un comportamiento aproximadamente lineal del error al dividir por los intervalos de la resistividad recomendada de diseño.

Errores promedio según profundidad de enterramiento:

- 0.4m de profundidad (terreno rocoso): -6.23%
- 0.8m de profundidad (terreno no cultivable): 2.11%
- 1.5m de profundidad (terreno cultivable): 10.40%

Los valores de error se muestran en la gráfica 5.6, y también es posible notar que la tendencia del error entre los datos calculados vs los datos simulados es similar entre los tipos de terreno.

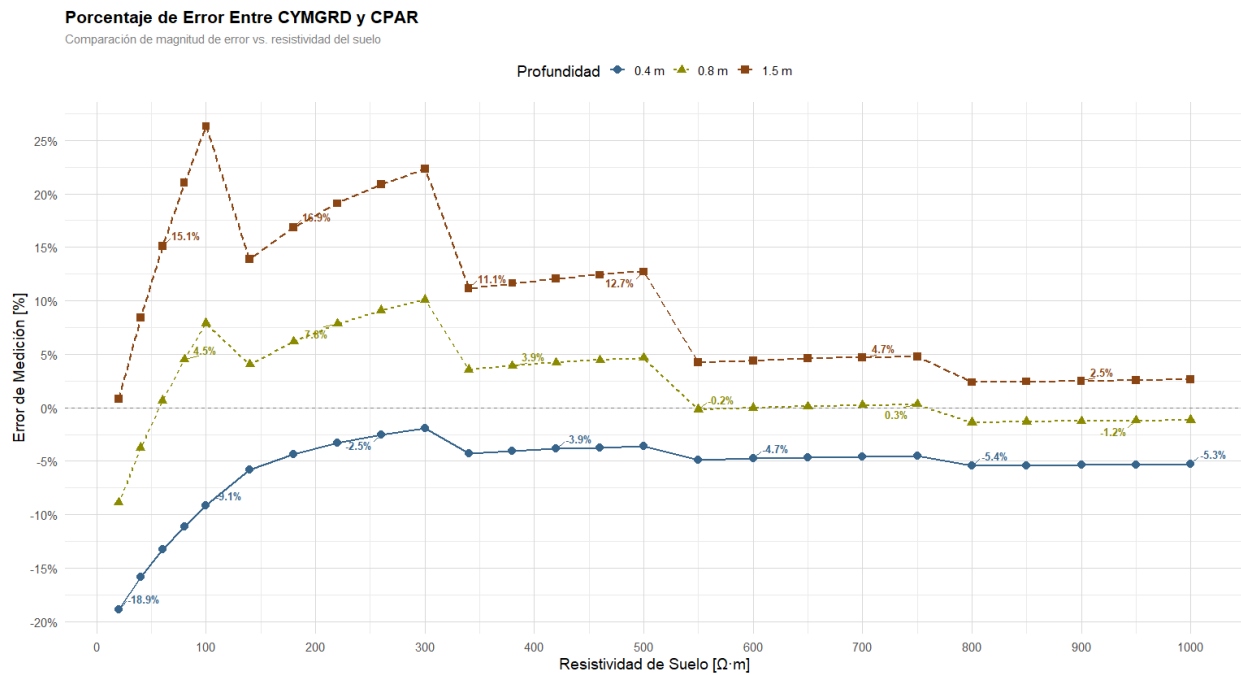


Figura 5.4 - Gráfica de Porcentaje de Error entre CYMGRD y CPAR para Estructuras Autoportadas

Los valores obtenidos son los siguientes, para los arreglos a 0.4m de profundidad:

Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra: CYMGRD vs CPAR

Comparación entre métodos de cálculo en función de la resistividad del suelo para estructuras auto soportadas. Profundidad = 0.4 m

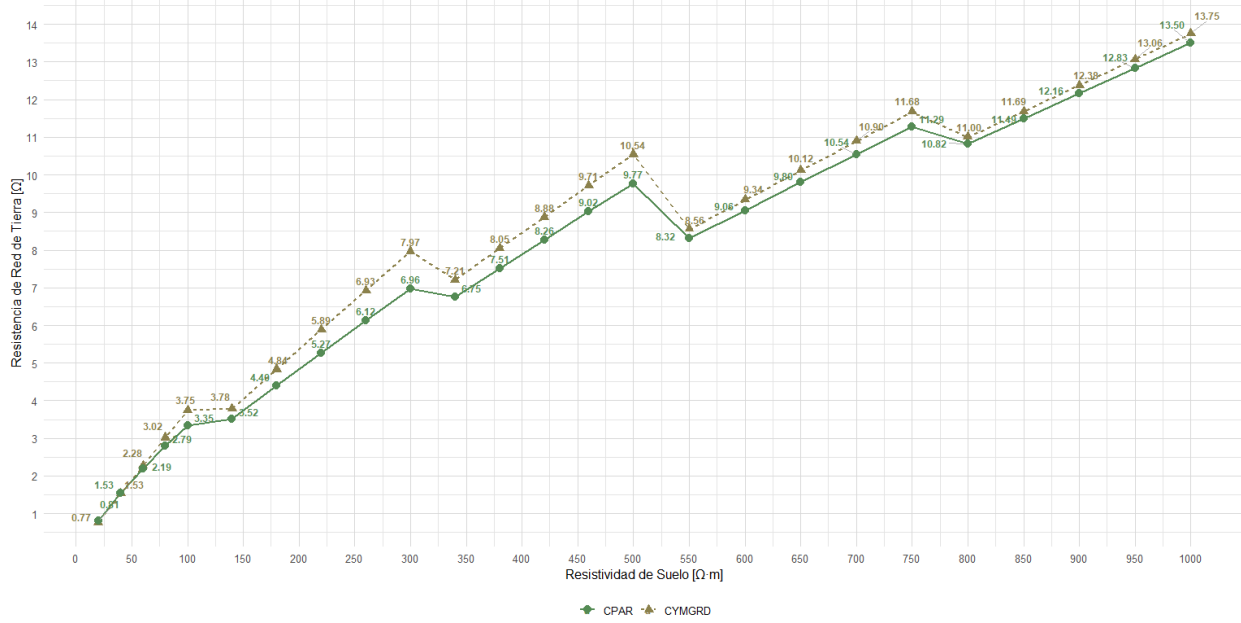


Figura 5.5 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Estructuras Auto Soportadas: CYMGRD vs CPAR - Profundidad de Enterramiento: 0.4m

Resistividad Evaluada (Ω)	Arreglo Usado	CYMGRD	Cálculo CPAR	Delta <i>calculo</i> vs CYMGRD (Ω)	% Error
20	AS1	0.7701	0.9157	-0.1456	-18.91%
40	AS1	1.5287	1.7707	-0.2420	-15.83%
60	AS1	2.2774	2.5797	-0.3023	-13.27%
80	AS1	3.0174	3.3527	-0.3353	-11.11%
100	AS1	3.7497	4.0927	-0.3430	-9.15%
140	AS2	3.7784	3.9976	-0.2192	-5.80%
180	AS2	4.8352	5.0464	-0.2112	-4.37%
220	AS2	5.8853	6.0808	-0.1955	-3.32%
260	AS2	6.9302	7.1054	-0.1752	-2.53%
300	AS2	7.9707	8.1231	-0.1524	-1.91%
340	AS3	7.2122	7.5187	-0.3065	-4.25%
380	AS3	8.0470	8.3717	-0.3247	-4.04%
420	AS3	8.8805	9.2234	-0.3429	-3.86%
460	AS3	9.7128	10.0742	-0.3614	-3.72%
500	AS3	10.5442	10.9243	-0.3801	-3.60%
550	AS4	8.5618	8.9781	-0.4163	-4.86%
600	AS4	9.3402	9.7831	-0.4429	-4.74%
650	AS4	10.1186	10.5880	-0.4694	-4.64%
700	AS4	10.8969	11.3927	-0.4958	-4.55%
750	AS4	11.6753	12.1973	-0.5220	-4.47%
800	AS5	11.0008	11.5998	-0.5990	-5.45%
850	AS5	11.6884	12.3189	-0.6305	-5.39%
900	AS5	12.3759	13.0379	-0.6620	-5.35%
950	AS5	13.0635	13.7569	-0.6934	-5.31%
1000	AS5	13.7510	14.4759	-0.7249	-5.27%

Tabla 5.1 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Estructuras Auto Soportadas: CYMGRD vs CPAR – Profundidad de Enterramiento: 0.4m

Arreglos a 0.8m de profundidad:

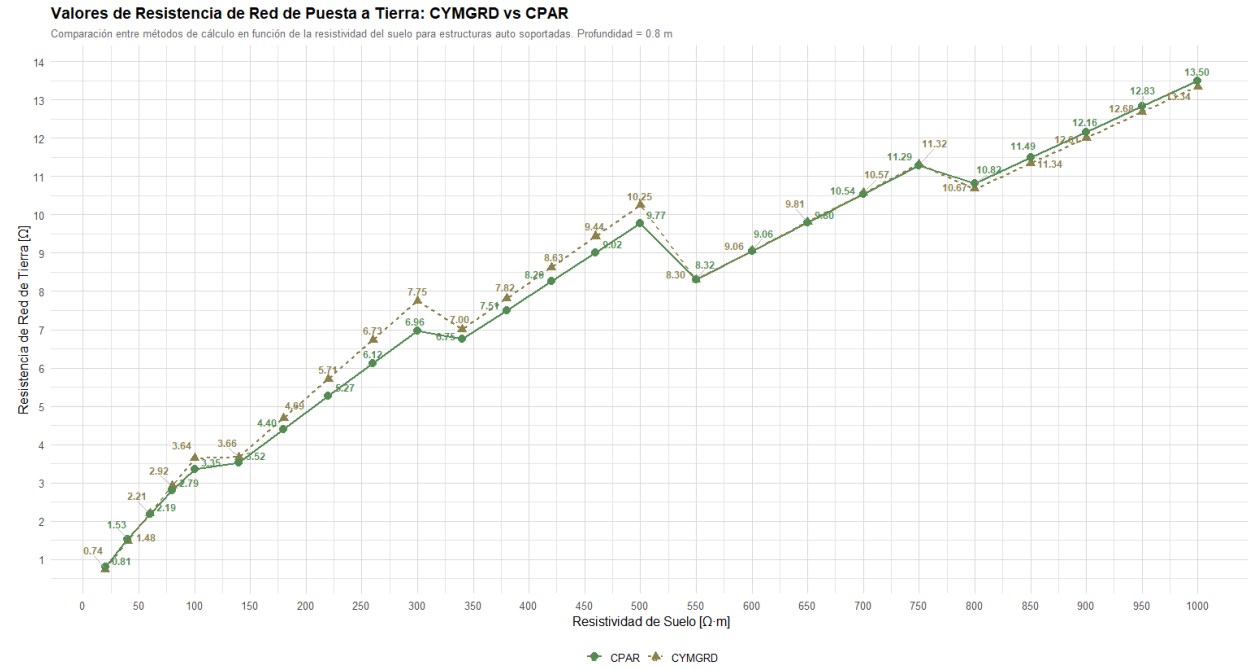


Figura 5.6 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Estructuras Auto Soportadas: CYMGRD vs CPAR - Profundidad de Enterramiento: 0.8m

Resistividad Evaluada (Ω)	Arreglo Usado	CYMGRD	Cálculo CPAR	Delta <i>calculo</i> vs CYMGRD (Ω)	% Error
20	AS1	0.7445	0.8107	-0.0662	-8.89%
40	AS1	1.4795	1.5348	-0.0553	-3.74%
60	AS1	2.2059	2.1909	0.0150	0.68%
80	AS1	2.9250	2.7926	0.1324	4.53%
100	AS1	3.6375	3.3501	0.2874	7.90%
140	AS2	3.6638	3.5157	0.1481	4.04%
180	AS2	4.6918	4.4008	0.2910	6.20%
220	AS2	5.7144	5.2670	0.4474	7.83%
260	AS2	6.7325	6.1203	0.6122	9.09%
300	AS2	7.7471	6.9643	0.7828	10.10%
340	AS3	7.0030	6.7541	0.2489	3.55%
380	AS3	7.8156	7.5102	0.3054	3.91%
420	AS3	8.6270	8.2648	0.3622	4.20%
460	AS3	9.4374	9.0183	0.4191	4.44%
500	AS3	10.2470	9.7709	0.4761	4.65%
550	AS4	8.3025	8.3159	-0.0134	-0.16%
600	AS4	9.0573	9.0589	-0.0016	-0.02%
650	AS4	9.8121	9.8017	0.0104	0.11%
700	AS4	10.5689	10.5444	0.0245	0.23%
750	AS4	11.3217	11.2869	0.0348	0.31%
800	AS5	10.6740	10.8205	-0.1465	-1.37%
850	AS5	11.3411	11.4900	-0.1489	-1.31%
900	AS5	12.0083	12.1595	-0.1512	-1.26%
950	AS5	12.6754	12.8289	-0.1535	-1.21%
1000	AS5	13.3425	13.4982	-0.1557	-1.17%

Tabla 5.2 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Estructuras Auto Soportadas: CYMGRD vs CPAR - Profundidad de Enterramiento: 0.8m

Arreglos a 1.5m de profundidad:

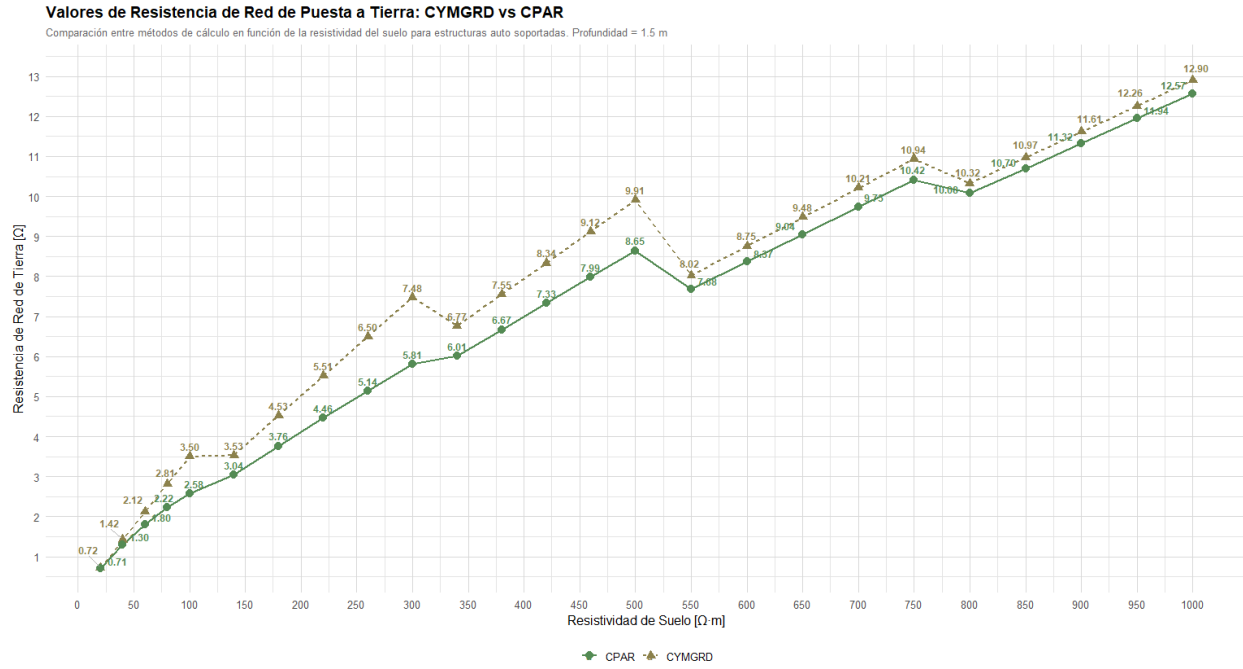


Figura 5.7 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Estructuras Auto Soportadas: CYMGRD vs CPAR - Profundidad de Enterramiento: 1.5m

Resistividad Evaluada (Ω)	Arreglo Usado	CYMGRD	Cálculo CPAR	Delta <i>calculo</i> vs CYMGRD (Ω)	% Error
20	AS1	0.7154	0.7094	0.0060	0.84%
40	AS1	1.4221	1.3024	0.1197	8.42%
60	AS1	2.1214	1.8011	0.3203	15.10%
80	AS1	2.8140	2.2225	0.5915	21.02%
100	AS1	3.5010	2.5794	0.9216	26.32%
140	AS2	3.5323	3.0426	0.4897	13.86%
180	AS2	4.5256	3.7628	0.7628	16.86%
220	AS2	5.5143	4.4610	1.0533	19.10%
260	AS2	6.4995	5.1416	1.3579	20.89%
300	AS2	7.4817	5.8103	1.6714	22.34%
340	AS3	6.7655	6.0116	0.7539	11.14%
380	AS3	7.5523	6.6731	0.8792	11.64%
420	AS3	8.3382	7.3328	1.0054	12.06%
460	AS3	9.1233	7.9911	1.1322	12.41%
500	AS3	9.9078	8.6482	1.2596	12.71%
550	AS4	8.0229	7.6828	0.3401	4.24%
600	AS4	8.7523	8.3665	0.3858	4.41%
650	AS4	9.4816	9.0449	0.4367	4.61%
700	AS4	10.2110	9.7331	0.4779	4.68%
750	AS4	10.9404	10.4161	0.5243	4.79%
800	AS5	10.3234	10.0781	0.2453	2.38%
850	AS5	10.9687	10.7003	0.2684	2.45%
900	AS5	11.6139	11.3224	0.2915	2.51%
950	AS5	12.2591	11.9445	0.3146	2.57%
1000	AS5	12.9043	12.5666	0.3377	2.62%

Tabla 5.3 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Estructuras Auto Soportadas: CYMGRD vs CPAR - Profundidad de Enterramiento: 1.5m

5.2.2 Validación - Postes tronónicos

De igual manera que con las estructuras auto soportadas, se tienen valores satisfactorios ya que estos están todos dentro del 25% de error al ser comparados con los valores obtenidos de CYMGRD. Se observan ligeras diferencias en el comportamiento del error al comparar los valores simulados vs los valores calculados, por ejemplo, los valores calculados son constantemente menores a los obtenidos en CYMGRD. A medida que la resistividad del suelo aumenta, la diferencia entre los valores calculados y simulados se reduce, teniendo un menor error para el suelo rocoso a más de 600 Ω -m, y los valores con una mayor variación entre CYMGRD y CPAR serán los arreglos a 1.5m de profundidad con

baja resistividad. A diferencia del error para las estructuras auto soportadas, el error para los distintos intervalos de la resistividad de diseño se mantiene mayormente constante

Errores promedio según profundidad de enterramiento:

- 0.4m de profundidad (terreno rocoso): 11.76%
- 0.8m de profundidad (terreno no cultivable): 12.58%
- 1.5m de profundidad (terreno cultivable): 13.29%

Los valores de error se muestran en la gráfica 5.10, y también es posible notar que la tendencia del error entre los datos calculados vs los datos simulados es similar entre los tipos de terreno.

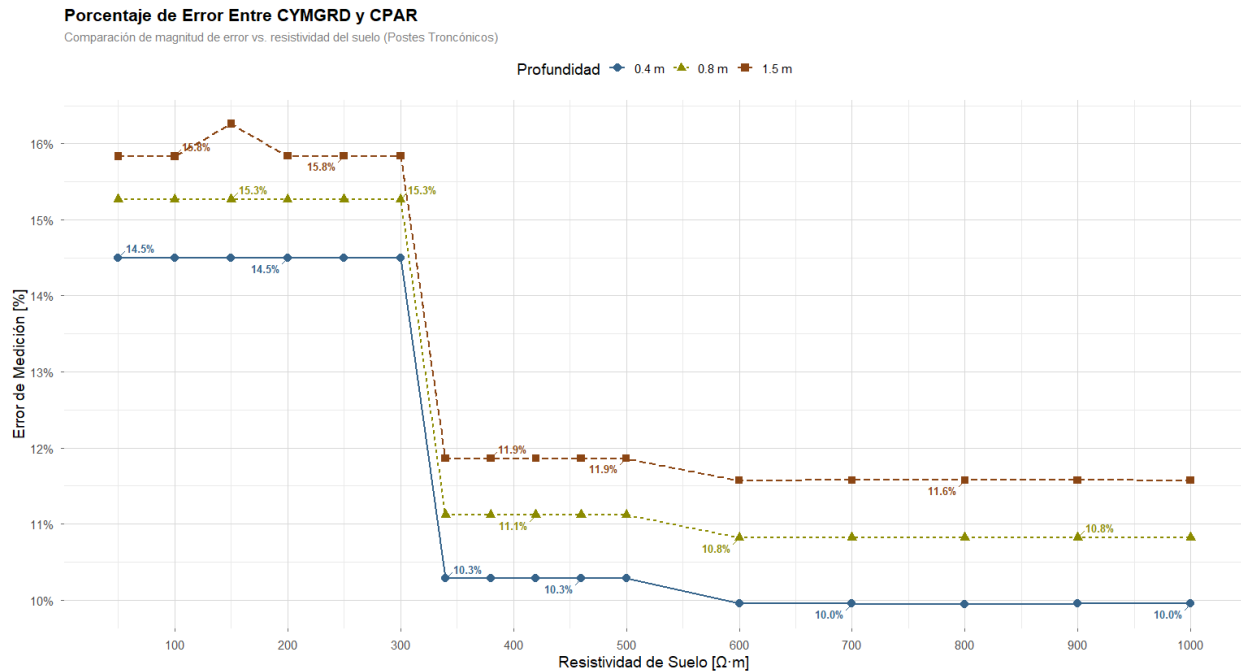


Figura 5.8 - Gráfica de Porcentaje de Error entre CYMGRD y CPAR para Postes Troncónicos

Los valores obtenidos son los siguientes, para los arreglos a 0.4m de profundidad:

Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra: CYMGRD vs CPAR

Comparación entre métodos de cálculo en función de la resistividad del suelo para postes troncoónicos. Profundidad = 0.4 m

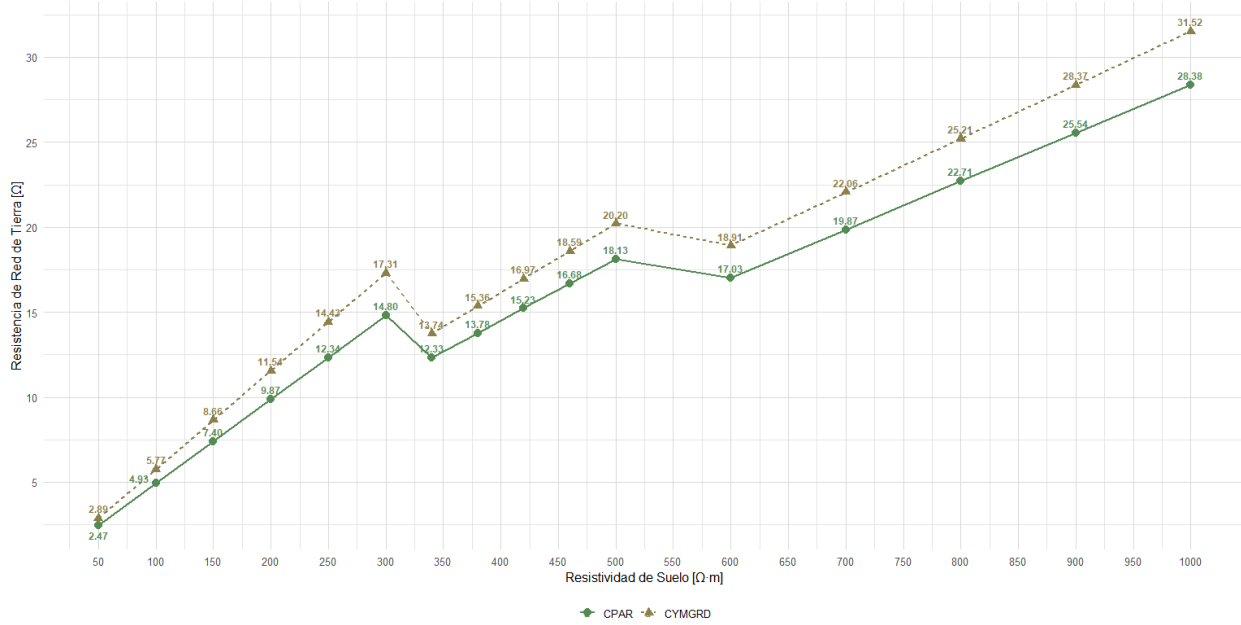


Figura 5.9 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Postes Troncoónicos: CYMGRD vs CPAR – Profundidad de Enterramiento: 0.4m

Resistividad Evaluada (Ω)	Arreglo Usado	CYMGRD	Cálculo CPAR	Delta calculo vs CYMGRD (Ω)	% Error
50	PT1	2.8853	2.4670	0.4183	14.50%
100	PT1	5.7706	4.9340	0.8366	14.50%
150	PT1	8.6559	7.4010	1.2549	14.50%
200	PT1	11.5413	9.8680	1.6733	14.50%
250	PT1	14.4266	12.3350	2.0916	14.50%
300	PT1	17.3120	14.8020	2.5100	14.50%
340	PT2	13.7393	12.3267	1.4126	10.28%
380	PT2	15.3557	13.7769	1.5788	10.28%
420	PT2	16.9721	15.2270	1.7451	10.28%
460	PT2	18.5885	16.6772	1.9113	10.28%
500	PT2	20.2049	18.1274	2.0775	10.28%
600	PT3	18.9118	17.0293	1.8825	9.95%
700	PT3	22.0638	19.8676	2.1962	9.95%
800	PT3	25.2127	22.7058	2.5069	9.94%
900	PT3	28.3677	25.5440	2.8237	9.95%
1000	PT3	31.5197	28.3822	3.1375	9.95%

Tabla 5.4 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Postes Troncoónicos: CYMGRD vs CPAR – Profundidad de Enterramiento: 0.4m

Arreglos a 0.8m de profundidad:

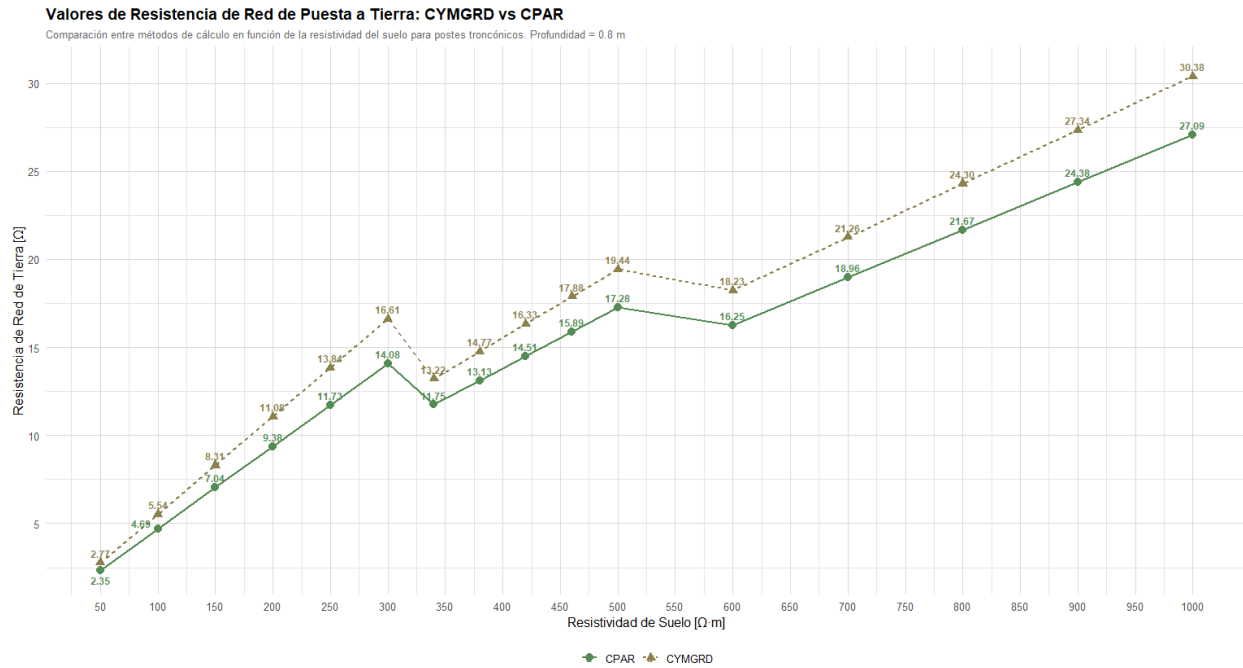


Figura 5.10 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Postes Troncocónicos: CYMGRD vs CPAR Profundidad de Enterramiento: 0.8m

Resistividad Evaluada (Ω)	Arreglo Usado	CYMGRD	Cálculo CPAR	Delta calculo vs CYMGRD (Ω)	% Error
50	PT1	2.7689	2.3462	0.4227	15.27%
100	PT1	5.5379	4.6924	0.8455	15.27%
150	PT1	8.3069	7.0386	1.2683	15.27%
200	PT1	11.0759	9.3848	1.6911	15.27%
250	PT1	13.8449	11.7310	2.1139	15.27%
300	PT1	16.6139	14.0772	2.5367	15.27%
340	PT2	13.2175	11.7476	1.4699	11.12%
380	PT2	14.7725	13.1297	1.6428	11.12%
420	PT2	16.3275	14.5118	1.8157	11.12%
460	PT2	17.8825	15.8938	1.9887	11.12%
500	PT2	19.4375	17.2759	2.1616	11.12%
600	PT3	18.2255	16.2537	1.9718	10.82%
700	PT3	21.2631	18.9626	2.3005	10.82%
800	PT3	24.3007	21.6716	2.6291	10.82%
900	PT3	27.3383	24.3805	2.9578	10.82%
1000	PT3	30.3759	27.0894	3.2865	10.82%

Tabla 5.5 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Postes Troncocónicos: CYMGRD vs CPAR - Profundidad de Enterramiento: 0.8m

Arreglos a 1.5m de profundidad:

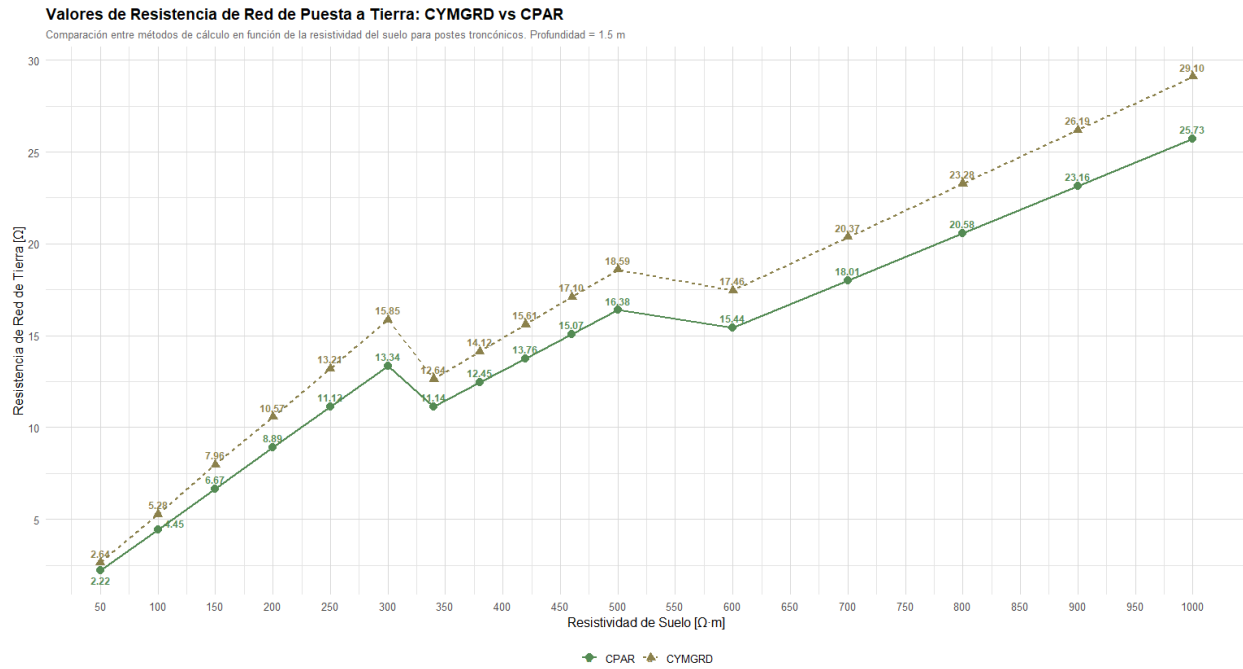


Figura 5.11 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Postes Troncoónicos: CYMGRD vs CPAR - Profundidad de Enterramiento: 1.5 m

Resistividad Evaluada (Ω)	Arreglo Usado	CYMGRD	Cálculo CPAR	Delta calculo vs CYMGRD (Ω)	% Error
50	PT1	2.6416	2.2233	0.4183	15.84%
100	PT1	5.2832	4.4465	0.8367	15.84%
150	PT1	7.9648	6.6698	1.2950	16.26%
200	PT1	10.5665	8.8930	1.6735	15.84%
250	PT1	13.2081	11.1163	2.0918	15.84%
300	PT1	15.8497	13.3395	2.5102	15.84%
340	PT2	12.6379	11.1389	1.4990	11.86%
380	PT2	14.1247	12.4493	1.6754	11.86%
420	PT2	15.6115	13.7598	1.8517	11.86%
460	PT2	17.0983	15.0702	2.0281	11.86%
500	PT2	18.5852	16.3807	2.2045	11.86%
600	PT3	17.4580	15.4376	2.0204	11.57%
700	PT3	20.3677	18.0105	2.3572	11.57%
800	PT3	23.2774	20.5834	2.6940	11.57%
900	PT3	26.1870	23.1563	3.0307	11.57%
1000	PT3	29.0967	25.7293	3.3674	11.57%

Tabla 5.6 - Valores de Resistencia de Red de Puesta a Tierra, Postes Troncoónicos: CYMGRD vs CPAR - Profundidad de Enterramiento: 1.5 m

5.3 Reporte de Diseño

Al completar la validación del diseño por medios analíticos, es necesario generar un reporte donde se muestren los valores medidos y calculados. Es posible tomar como base el reporte generado por CPAR como una base de los valores que se mostrarán, ya que el diseño estará definido siempre por:

- Tipo de estructura que se usa – Poste troncoónico o torre auto soportada
- Resistividad recomendada de diseño, es decir, el modelo equivalente de suelo uniforme para el terreno donde se localizará la estructura de subtransmisión/transmisión y su respectiva red puesta a tierra
- Profundidad de enterramiento del arreglo
- Radio de varillas y contra-antenas
- Cantidad de varillas a usar por contra-antena
- Cantidad de contra-antenas y longitud de las mismas
- Resistencia equivalente del arreglo
- Cumplimiento de criterio de aceptación

5.4 Análisis de Desempeño a Rayos

La selección de ruta para las líneas de transmisión es relevante no solo por cómo afecta la resistividad del suelo a los valores de resistencia de red de tierra, sino también, por la cantidad de descargas atmosféricas a las que se vea sujeta cada estructura que forma parte de la línea o sistema de subtransmisión/transmisión, ya que la selección de la ruta también determinará la exposición a rayos que tendrá.

La exposición a rayos de las líneas depende tanto de la densidad de descargas a tierra y de la relación física con su entorno. Una estructura que sobresale en un terreno plano o en la cima de una montaña es más probable que reciba impactos de descarga directa comparado a estructuras que estén protegidas por elementos naturales al estar rodeadas de montañas o cerros. Igualmente, al incrementar la altura de la estructura se incrementará la cantidad de incidencias con rayos, debido a que una estructura más alta recibirá más descargas.

Por medio de (4) se puede calcular la tasa de colección de descargas para una estructura:

$$N_s = N_g \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) \quad (4)$$

Donde:

N_s : Descargas por cada 100km por año

N_g : Densidad de descargas a tierra [descargas/km²/año]

h : Altura de la estructura [m]

b : Separación de cables de guarda [m]

Si el valor de densidad de descargas a tierra no se tiene disponible, es posible estimarlo por medio de [2]:

$$N_g = 0.04T_d^{1.25} \quad (3)$$

Donde:

N_g : Densidad de descargas a tierra

T_d : Número de días con tormenta eléctrica por año (Nivel isoceraúnico)

Debido a ser un país tropical con alta incidencia de lluvias eléctricas, una estimación en la práctica para el nivel isoceraúnico promedio de El Salvador puede ser de 125 días/trueno. Este valor de nivel isoceraúnico en base a la Figura 2.5 puede considerarse elevado ya que, al observar el mapa, la mayoría de zonas del país presenta una menor incidencia de días tormenta al año, pero por propósitos de análisis se usa debido a la utilidad que presenta el uso de un caso de condiciones críticas.

Cuando una descarga impacta un poste o una torre de transmisión, una parte de la descarga viajará hacia tierra por medio de la torre y otra será viajará por medio de los cables de guarda. La magnitud de la onda de voltaje que se refleja en la torre dependerá directamente de la impedancia al pie de la estructura; un estrés de voltaje suficientemente alto puede resultar en un flameo inverso. Ya que el voltaje de la torre es altamente dependiente de la impedancia encontrada (al tener ambos una relación lineal) se vuelve muy importante tener un valor de impedancia bajo para un buen desempeño a rayos de la línea.

Para realizar el análisis de desempeño se puede usar el programa Flash 2.0 de IEEE, donde por medio del uso de la curva volt-tiempo se obtienen las tasas de falla que permiten obtener las tasas de falla de la estructura que forma parte del sistema de potencia. Estos análisis se realizan modelando el tipo de estructura (poste o torre autosoportada) junto al cable(s) de guarda y la magnitud de la resistencia de la red de puesta a tierra. De esta forma, se evaluarán los valores máximos permitidos de la resistencia de red de puesta a tierra

(criterios de aceptación de 10Ω para estructuras autoportadas y 20Ω para postes tronónicos) para estimar la confiabilidad de las líneas en El Salvador.

5.4.1 Flash 2.0 – Estructuras Autoportadas

Se realiza un análisis con un valor de resistencia de red de tierra de 10Ω (según criterio CFE 00J00-52), modelando una torre autoportada con dos cables de guarda y 2 circuitos, con las siguientes especificaciones:

- Altura de la torre: 40.7 metros
- Medidas de la base: 8.5 metros
- Dos circuitos con conductor ACSR Drake (28.11mm de diámetro nominal)
- Dos cables de guarda, OPGW
- Densidad de descargas a tierra: 16.71

Las dimensiones y cotas para este análisis teórico son extraídas del Catálogo de Estructuras de Transmisión de la Comisión Federal de Electricidad, en base a la estructura mostrada en la figura siguiente. Las dimensiones exactas para una estructura de este tipo pueden variar en la práctica debido a los requerimientos de diseño de cada ubicación; sin embargo, las dimensiones presentadas representan una buena base para un análisis práctico dadas las condiciones de operación del país.

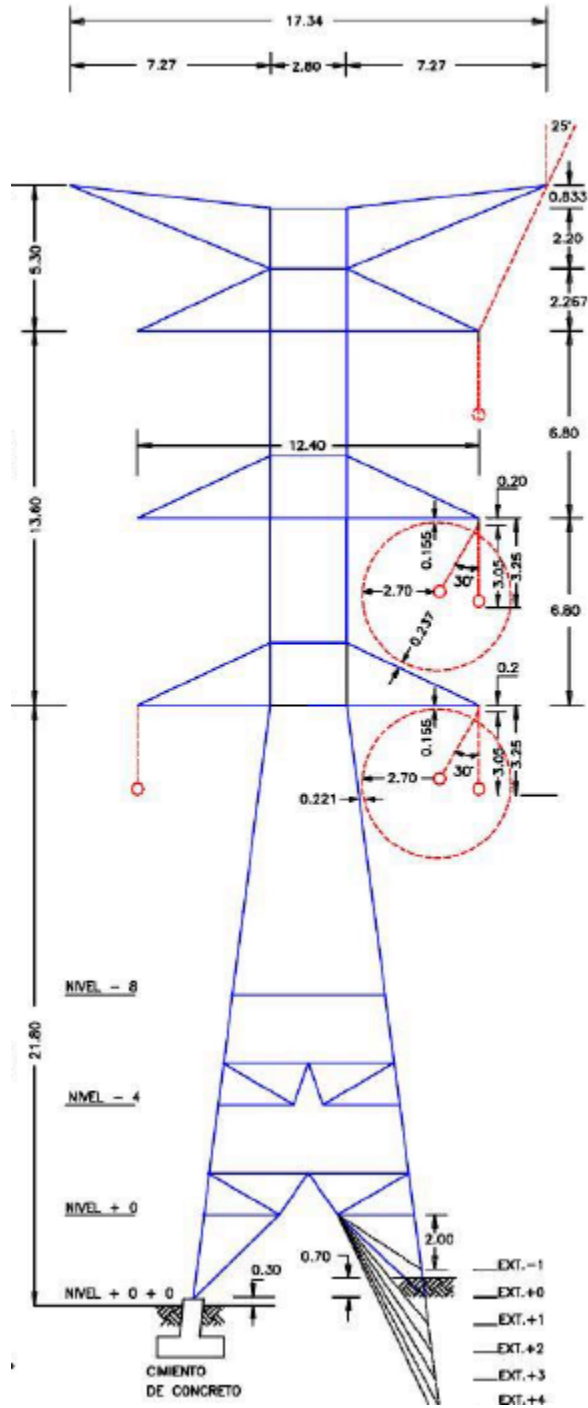


Figura 5.12 - Estructura Modelo Usada Para Análisis de Desempeño a Rayos de Líneas de 230kV

El modelo de la estructura [10] se ingresa en los parámetros de Flash 2.0, dando como resultado los datos que se observan en la siguiente imagen, tomada directamente de la interfaz del programa en Excel:

limitantes de Flash es que se analiza la estructura de transmisión como un elemento aislado que no considera la influencia de las demás estructuras interconectadas del sistema, lo que permitirá tener un mejor desempeño al instante de tener el impacto de una descarga atmosférica en el sistema.

En base a los resultados mostrados en la Figura 5.13, se considera que el criterio de aceptación de 10Ω como valor máximo de resistencia para una red de puesta a tierra en estructuras autosoportadas es válido, ya que garantiza un buen nivel de confiabilidad ante eventualidades meteorológicas.

5.4.2 Flash 2.0 - Postes tronónicos

Para los postes tronónicos, se realiza el mismo proceso de análisis con respecto al desempeño a rayos, modelando un poste tronónico con un cable de guarda y 1 circuitos, con las siguientes especificaciones:

- Altura: 15.86 metros
- Diámetro de la base: 0.5 metros
- Un circuito con conductor ACSR Piper (17.83mm de diámetro nominal)
- Un cable de guarda, OPGW
- Densidad de descargas a tierra: 16.71

El modelo de poste para este análisis es el de un poste tronónico de concreto, con un solo circuito y usando un crucero en el que se colocan las tres fases, y usando un cable de guarda en el punto más alto del poste. El modelo de la estructura se ingresa en los parámetros de Flash 2.0, y el análisis se empezará con el criterio de aceptación de 30Ω (según criterio CFE 00J00-52). Obteniendo como resultado los datos que se observan en la siguiente imagen, tomada directamente de la interfaz del programa en Excel:

Análisis a 30Ω :

Title	Desempeño a rayos - Línea de 115kV en Poste						<input checked="" type="checkbox"/> Details to Log File:		
GFD [per sq km]	16.71	<input type="radio"/> English Units <input checked="" type="radio"/> Metric Units				Log File: c:\ieeeflash\tesis\postes-30ohm.out			
Span [m]	140								
Conductors									
Diameter [mm]	17.83	# Bundled		1		Shield Wires			
Sag [m]	2.47	Spacing [mm]		0		Diameter [mm]	9.779		
Index	X [m]	Y [m]	SI [m]	kV	Angle	AC/DC?	Sag [m]	1.55	
1	1.345	13.17	1.378	115	0	ac	Index	X [m]	
2	-1.345	10.73	1.378	115	-120	ac	1	0.175	
3	1.345	8.292	1.378	115	120	ac	2	15.761	
4							Exposed Conductors		
5							Shielding Angles		
6							Index	Conductor	
7							1	1	
8							2	2	
9							3	3	
10							4		
11							Flashover Rates		
12							Percentage (*) Ohms		
Tower Model		3 - Cylinder	Do Not Edit:						
Height	15.86 [m]	1 - Cone							
-not used-	0 [m]	2 - H Frame							
Diameter	0.5 [m]	3 - Cylinder							
-not used-	0 [m]	4 - Waist							
-not used-	0 [m]								
Version 2.04 - May 2012									
Footing Resistances							Flashover Rates		
							Backflash	38.78 /100 km/yr	
							Shielding Failure	0.00 /100 km/yr	
							Total	38.78 /100 km/yr	
							Critical Currents		
							kA		
							0.00		
							47.54		
							45.21		

Figura 5.14 - Captura de Pantalla de Flash 2.0, Simulación de Desempeño a Rayos de una Línea de Transmisión de 115kV en Poste Troncocónico, Resistencia de Tierra: 30Ω

De la Figura 5.14, se concluye:

- El desempeño de la línea respecto a las fallas de blindaje es satisfactorio, ya que éste tiende a 0
- El desempeño de la línea respecto a las fallas de flameo inverso no es satisfactorio, ya que un valor de 38.78 es elevado, esto disminuye la confiabilidad de la línea y el sistema de transmisión, llevando a repetidas interrupciones o representando costos elevados de mantenimiento

Basado en los resultados mostrados en la Figura 5.14, el criterio de 30Ω se demuestra insuficiente debido a la alta tasa de fallas.

Ya que el criterio presentado en la norma CFE 00J00-52 deriva en una alta incidencia de fallas, se procede a analizar el desempeño de la línea con un valor de resistencia de red de tierra menor, el cual se encuentra en el Acuerdo 29-E-2000 de SIGET. Este criterio especifica un valor máximo de puesta a tierra de 25Ω y su desempeño en la línea usando el modelo analizado anteriormente es el siguiente:

Title		Desempeño a rayos - Línea de 115kV en Poste					<input checked="" type="checkbox"/> Details to Log File:			
GFD [per sq km]	16.71	<input type="radio"/> English Units <input checked="" type="radio"/> Metric Units					Log File: c:\ieeeflash\tesis\postes-25ohm.out			
Span [m]	140									
Conductors							Shield Wires			
Diameter [mm]	17.83	# Bundled		1		Diameter [mm]	9.779			
Sag [m]	2.47	Spacing [mm]		0		Sag [m]	1.55			
Index	X [m]	Y [m]	SI [m]	kV	Angle	AC/DC?	Index	X [m]	Y [m]	
1	1.345	13.17	1.378	115	0	ac	1	0.175	15.761	
2	-1.345	10.73	1.378	115	-120	ac	2			
3	1.345	8.292	1.378	115	120	ac				
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
Tower Model							Exposed Conductors			
3 - Cylinder		Do Not Edit:					Index		Conductor	
Height	15.86 [m]	1 - Cone					Shield Wire		Shielding Angles	
-not used-	0 [m]	2 - H Frame					Required		Actual	
Diameter	0.5 [m]	3 - Cylinder					kA		Icrit	
-not used-	0 [m]	4 - Waist								
-not used-	0 [m]									
Version 2.04 - May 2012							Percentage (*) Ohms		Flashover Rates	
							100		Backflash	
							25		Shielding Failure	
									Total	
									Critical Currents	
									kA	
									0.00	
									54.05	
									51.41	

Figura 5.15 - Captura de Pantalla de Flash 2.0, Simulación de Desempeño a Rayos de una Línea de Transmisión de 115kV en Poste Tronónico, Resistencia de Tierra: 25Ω

De la Figura 5.15, se concluye:

- El desempeño de la línea respecto a las fallas de blindaje es satisfactorio, ya que éste tiende a 0
- El desempeño de la línea respecto a las fallas de flameo inverso no es satisfactorio, ya que un valor de 30.02 es elevado, esto disminuye la confiabilidad de la línea y el sistema de transmisión, llevando a repetidas interrupciones o representando costos elevados de mantenimiento

Basado en los resultados mostrados en la Figura 5.15, el criterio de 25Ω se muestra igualmente insuficiente debido a la alta tasa de fallas. Por lo que se decide analizar un nuevo criterio con una resistencia máxima de 20Ω. Este criterio se deriva a partir de la demostración de la insuficiencia de los dos criterios anteriores, resultando en:

Por lo tanto, se acepta el criterio de 20Ω como magnitud máxima de resistencia de red de tierra para postes tronónicos.

Bibliografía

- [1] IEEE Std 80-2013 - IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding
- [2] IEEE Std 1243-1997 - IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines
- [3] EATON, «CYMGRD Brochure» 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/utility-and-grid-solutions/distributed-energy-resources-software-applications/eaton-cyme-cymgrd-substation-grounding-brochure-es-mx.pdf>. [Último acceso: 16 Enero 2026].
- [4] Asamblea Legislativa de la República de El Salvador, *Decreto N°1003 - Ley de Constitución de Servidumbres para las Obras de Electrificación Nacional*, San Salvador, 1997.
- [5] Comisión Federal de Electricidad, *Especificación CFE 00J00-52, Red de Puesta a Tierra para Estructuras de Líneas de Transmisión Aéreas de 69kV a 400kV en Construcción*
- [6] Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones, Acuerdo No. 29-E-2000, Normas Técnicas de Diseño, Seguridad y Operación de las Instalaciones de Distribución Eléctrica
- [7] IEEE Std 81-2012, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System
- [8] J. He, Y. Gao, R. Zeng, J. Zou, X. Liang, B. Zhang, J. Lee y S. Chang, «Effective Length of Counterpoise Wire Under Lightning Current,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, n° 2, pp. 1585 - 1591, 2005.
- [9] E. D. Sunde, «Resistance of Grounding Arrangements,» de *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*, New York, Dover Publications, 1968, pp. 75-86.
- [10] Comisión Federal de Electricidad, *Catálogo de Estructuras de Transmisión*

Conclusiones

1. La configuración recomendada para las redes de puesta a tierra de líneas aéreas de 46 a 230kV es radial con varillas de tierra vertical enterradas a una profundidad adecuada según el uso de suelo, siendo diferenciadas por el tipo de estructura que se use, ya sean postes o torres autosoportadas. Para los postes troncocónicos, se recomienda dos contra-antenas, usando varillas de tierra con tres metros de separación entre ellas. Para las torres se recomienda un arreglo de cuatro contra-antenas, cada una conectada a una pata de la estructura, usando varillas de tierra con 6 metros de separación entre ellas. En ambos casos, a medida aumente la resistividad del suelo se irán añadiendo etapas que aumentarán la longitud total de cada contra-antena y la cantidad total de varillas de tierra, limitada por la longitud efectiva a la descarga de corrientes de rayo.
2. Siguiendo las recomendaciones de la norma IEEE Std 81-2012, se propone como un método práctico y confiable para realizar mediciones de resistividad de suelo el Método de Wenner, y para la medición de resistencia de red de puesta a tierra el Método de Caída de Potencial. Estos métodos presentan una buena fiabilidad de resultados y al mismo tiempo con los formatos propuestos, también prueban ser prácticos al momento de comunicar resultados. La interpretación de los resultados de las mediciones generalmente debe ser de un suelo uniforme o de dos capas, considerando las recomendaciones de la IEEE Std 80: a) la resistividad en suelo uniforme sería el promedio de todas las mediciones tomadas, o el promedio de las mediciones máximas y mínimas, y el criterio de selección es la que da el menor error cuadrático; y b) la resistividad del suelo de dos capas se puede encontrar usando la técnica de Sunde y el valor para hacer el diseño es el de la segunda capa.
3. El valor recomendado de puesta a tierra en este manual es de 20Ω para postes y 10Ω en torres autosoportadas, a fin de lograr un desempeño aceptable a los rayos. Una buena puesta a tierra tendrá elementos de cobre, copperweld o acero inoxidable, cumplirá el criterio de aceptación al no sobrepasar el valor máximo mencionado para poder asegurar un buen desempeño ante descargas atmosféricas. Igualmente, la red de puesta a tierra deberá estar enterrada a las profundidades propuestas para garantizar la integridad de esta a largo plazo, y usará conexiones por medio de soldadura exotérmica para asegurar que no existan falsos contacto entre elementos y una vida útil de las conexiones de 30 años o más. De la misma manera, una mala

puesta a tierra no cumplirá los valores máximos permitidos, usará elementos mecánicos para conexión, usará aluminio y tendrá contra-antenas de longitud mayor a su longitud efectiva. Como criterio de ingeniería, los límites máximos de una “buena” puesta a tierra para líneas aéreas tratadas en el Manual y recomendados por la IEEE es de 25 Ω para líneas de 46 kV y de 15 Ω para el resto de los voltajes de transmisión; los valores de “mala” puesta a tierra es de 100 Ω para líneas de 46 kV y de 200 Ω para líneas de transmisión hasta 230 kV.

4. El programa Flash 2.0 ha permitido analizar y corroborar los valores máximos permitidos para los criterios de aceptación de las redes de puesta a tierra, ya que por medio del análisis del programa es posible estimar tasas de falla de contoneo inverso y de blindaje, lo que permite de forma directa estimar la confiabilidad de la línea respecto a descargas atmosféricas, lo cual ya que El Salvador es un país tropical con alta incidencia de rayos cobra especial importancia. Con el análisis de los modelos presentados a 115kV para postes tronónicos y a 230kV para las estructuras autosoportadas, una resistencia de red de tierra de 10 Ω para torres autosoportadas presenta una tasa de falla de 1.89 fallas/100 km/año, mientras que una resistencia de red de tierra de 20 Ω para postes tronónicos presenta una tasa de fallas de 20.98 fallas/100 km/año, teniendo ambos casos con una tasa de falla de blindaje menor a 0.05 fallas /100 km/año.
5. Para una operación adecuada de las redes de tierra estas se deben construir en el derecho de servidumbre de la línea, y es muy importante también, analizar el uso que el suelo tendrá a futuro con lo cual se establecen reglas para la profundidad de enterramiento del conductor de tierra. Se clasifican tres posibles escenarios: a) si la red de tierra se construye en terreno cultivable la profundidad será de 1.5 m; b) en un suelo no cultivable se enterrará la red de tierra a 0.8 m; y c) en suelo rocoso deberá tener su red de puesta a tierra a 0.4 m de profundidad. De igual manera, es muy importante prevenir posibles daños por vandalismo, dado que aún en la actualidad se presenta el hurto de conductor de cobre y de acero recubierto de cobre (conductor Copperweld); una solución práctica y confiable es el uso de elementos y conductor de acero galvanizado o realizar la puesta a tierra sin elementos de cobre visible. Ambas acciones preventivas tienen el mismo fin, de garantizar la integridad de la red de puesta a tierra en el tiempo.
6. Para la construcción de las redes de puesta a tierra para líneas de subtransmisión y transmisión, se sugiere usar conductores y accesorios de acero galvanizado o de acero recubierto por cobre, y al mismo tiempo, evitar los conectores mecánicos ya

que estos pueden aflojarse con el tiempo, reduciendo la calidad en el contacto entre elementos y requiriendo una mayor cadencia de mantenimiento. Las varillas de tierra pueden ser de acero galvanizado; si se usan varilla de acero recubierta por cobre, se deberán tener las precauciones para lograr una buena conexión al conductor de tierra a fin de evitar corrosión por materiales disímiles. Una red de tierra que tenga elementos que no estén correctamente interconectados entre sí, representará una mayor probabilidad de eventos de falla, afectando a todos los clientes conectados al sistema eléctrico de potencia.

7. En base al trabajo de Erling D. Sunde en *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*, se han utilizado en el Manual dos modelos de cálculo que permiten calcular sin necesidad de software especializado (como CYMGRD) la resistencia de red de tierra de los arreglos propuestos. Estos dos modelos son presentados en forma de ecuaciones en este trabajo, y con el fin de facilitar el uso de los mismos. Estos modelos de cálculo dan paso a la creación de CPAR, una herramienta ejecutable en Windows que permite el cálculo rápido de la resistencia equivalente del arreglo en base a la resistividad del terreno, profundidad de enterramiento, dimensiones del conductor usado para las contra-antenas y varillas de tierra, y que también incluye una verificación de la longitud efectiva de una contra-antena, para evaluar la correcta disipación de corriente en caso de una descarga atmosférica. Los resultados del programa CPAR se han constatado con modelos detallados construidos y simulados en CYMGRD.

Observaciones

El modelado de sistemas o fenómenos físicos es una práctica muy común dentro de la ingeniería, y la base de este trabajo no es la excepción. Si bien es cierto que el suelo puede asumirse con un modelo de suelo de dos o más capas para su análisis, el método de cálculo y las mediciones obtenidas trabajan en función de un método más sencillo, el de suelo uniforme. El uso de este modelo de suelo, permite hacer uso de herramientas existentes que dan como resultado una aproximación útil a los resultados reales, logrando así una valiosa primera iteración de los resultados finales de la magnitud de resistencia de una red de puesta a tierra para una línea de subtransmisión o transmisión. A pesar que los valores obtenidos serán solo una aproximación al valor esperado y no serán exactamente iguales a los valores finales, los datos obtenidos aún tienen un gran valor ya que los factores que afectan la magnitud final de la resistencia de puesta a tierra crean un entorno en constante evolución, dificultando tener un valor fijo o permanente como magnitud. La humedad, contenido de sales, calidad de contactos entre contra-antenas y varillas y la superficie de contacto entre las partículas del suelo y los electrodos del sistema de puesta a tierra crean variaciones en el valor final real, sin embargo, el valor de los modelos propuestos reside en la posibilidad de poder estimar valores que garanticen el correcto funcionamiento de la puesta a tierra, con el fin de proteger y sumar a la confiabilidad del sistema de potencia.

Una buena puesta a tierra es clave para la confiabilidad del sistema en El Salvador, debido a la alta incidencia de descargas atmosféricas durante la época lluviosa, ya que permitirá que la probabilidad de daños ocasionados por impactos directos de rayos en estructuras del sistema de subtransmisión/transmisión sea menor, al disipar eficientemente a tierra las corrientes de estos eventos, reduciendo las desconexiones no planificadas de las líneas de subtransmisión/transmisión.

Recomendaciones

1. Implementar un estándar nacional para el proceso de diseño y construcción de las redes de tierra para líneas aéreas de 46kV, 115kV y 230kV. La falta de un estándar o guía de diseño lleva a discrepancias en el proceso constructivo final de las redes de tierra en el sistema de potencia de El Salvador. Estas diferencias se pueden traducir desde un mayor esfuerzo necesario para su mantenimiento (ya que puede no saberse exactamente qué se encontrará en sitio) a impactos en la confiabilidad del sistema.
2. Usar configuraciones radiales para los electrodos de las redes de puesta a tierra. Ya que una de las principales funciones de los sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión/subtransmisión es disipar la corriente en eventos de descargas atmosféricas hacia tierra, un arreglo radial es más eficiente cuando se compara a un arreglo no radial, por ejemplo, como el propuesto en la norma CFE 00J00-52. Igualmente, un arreglo radial presenta una mayor longitud efectiva en sus contra-antenas comparado a un arreglo formado por una contra-antena y varillas de tierra conectados al mismo.
3. Realizar un análisis de desempeño a rayos como parte del proceso de diseño de la red de tierra en las líneas de subtransmisión/transmisión. El Salvador tiene una incidencia alta de descargas atmosféricas debido a su ubicación tropical, lo que aumenta considerablemente la probabilidad de fallas ocasionadas por impactos directos de rayos a las estructuras del sistema de potencia. Una estructura/línea que tenga un pobre desempeño ante descargas atmosféricas representará un eslabón débil en el sistema de potencia, ocasionando interrupciones del servicio y que generará costos adicionales no solo en su mantenimiento correctivo o reacondicionamiento, sino también puede generar pérdidas económicas para usuarios finales.
4. Realizar cálculos durante el proceso de diseño de la red de puesta a tierra permitirá tener una idea aproximada de los resultados finales a obtener al finalizar la construcción, reduciendo la probabilidad de que el valor final de resistencia no sea un valor satisfactorio al realizar las mediciones finales. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que el modelo presentado es una aproximación a un modelo de suelo uniforme, y en la práctica muy rara vez se encontrará este escenario. De igual

manera, el proceso constructivo y la misma naturaleza del terreno puede influir en la superficie del terreno que esté en contacto con las contra-antenas y varillas de tierra; por lo que pequeñas variaciones entre los valores calculados y los valores finales son esperadas.

5. Fomentar el conocimiento de las redes de tierra para líneas de transmisión y subtransmisión para ingenieros en formación. Actualmente la discusión de líneas de tierra se suele enfocar hacia subestaciones (véase el estudio basado en IEEE Std 80, IEEE Std 142), y haciendo poco énfasis en las estructuras del sistema de potencia. El estudio y discusión del diseño de las redes de tierra para postes y estructuras autosoportadas también contribuirá a un sistema más robusto, confiable y seguro.

Anexos. Formatos de Reporte de Medición

Reporte de Medición de Resistividad del Suelo

Datos del sitio

Línea: _____ Código Estructura: _____ Fecha: _____
Dirección: _____

Datos del equipo

Marca: _____ Modelo: _____ Número de Serie: _____ Frecuencia Medición: _____ Hz
Fecha de Calibración: _____ Fecha de Vencimiento: _____

Suelo y complementarios

Estado del suelo: Mojado ___ Húmedo ___ Lodo ___ Seco ___ Cultivado: ___
Observaciones del suelo: _____
Tipo de suelo: _____
Responsable de mediciones: _____

Resultado de mediciones

a (m)	R ₁ (Ω)	ρ ₁ (Ω-m)	R ₂ (Ω)	ρ ₂ (Ω-m)	Observaciones
0.3					
0.9					
1.5					
3.0					
4.5					
6.1					
9.1					
15.2					
21.3					
27.4					

Notas:

- Deben realizarse 2 mediciones para cada longitud, y luego calcular el promedio por cada separación
- En la medición con distancia A = 1.6m, la profundidad máxima de los electrodos es 16cm, para las demás mediciones debe ser, de preferencia menor a 32cm
- Fórmula para cálculo:

$$\rho = 2\pi aR$$

a: Separación entre electrodos [m]

R: Resistencia Medida

Reporte de Medición de Resistencia de Red de Puesta a Tierra

Datos del sitio

Línea: _____ Código Estructura: _____ Fecha: _____

Dirección: _____

Datos del equipo

Marca: _____ Modelo: _____ Número de Serie: _____ Frecuencia Medición: ___ Hz

Fecha de Calibración: _____ Fecha de Vencimiento: _____

Suelo y complementarios

Estado del suelo: Mojado ___ Húmedo ___ Lodo ___ Seco ___

Cultivado: _____ Observaciones del suelo: _____

Tipo de suelo: _____ Responsable de mediciones: _____

Dirección de la medición respecto a contra-antena: Perpendicular _____ Paralela _____

Resultado de mediciones

Distancia d_{E-C} : _____ m

Medición	Distancia electrodo de potencial [m]	Lectura de resistencia [Ω]	Observaciones
0.52 d_{E-C}	39		
0.62 d_{E-C}	46.5		
0.72 d_{E-C}	54		

Valor aceptado de resistencia del arreglo (62%): _____ [Ω]

Si cualquiera de las condiciones siguientes no se cumple:

- Si la diferencia máxima entre mediciones es menor que 1Ω para cuando el valor máximo medido es menor que 5Ω
- La diferencia máxima entre mediciones es menor que el 15% para cuando el valor máximo medido es mayor que 5Ω

La distancia d_{E-C} (entre el electrodo de corriente y el arreglo de red de tierra debe ser duplicada hasta que se cumpla una de ellas.

Cálculo de variación:

$$\Delta R = \frac{(R_2 - R_1)}{R_2} * 100\%$$

Nota: $d_{E-C} = 50m$ si la longitud de las contra-antenas es menor a 12m. Para longitudes mayores a 12m, $d_{E-C} = 75m$

Anexos. Diagrama de Flujo, Lógica CPAR

