

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



TRABAJO DE GRADUACIÓN:
ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE REDES DE TIERRA DE
SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

PRESENTADO POR:
VLADIMIR STANLEY REYES AGUILAR
KEVIN ROLANDO SÁNCHEZ YESCAS

PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO 2025

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LIC. PEDRO ROSALIO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO:

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR INTERINO:

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:

**ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE REDES DE TIERRA DE
SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN POR ELEMENTOS FINITOS**

PRESENTADO POR:

**VLADIMIR STANLEY REYES AGUILAR
KEVIN ROLANDO SÁNCHEZ YESCAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR:

DOCENTE ASESOR:

ING. NUMA POMPILIO JIMÉNEZ CORTEZ

SAN SALVADOR, JUNIO 2025

TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR:

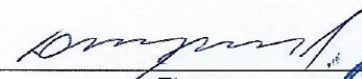
DOCENTE ASESOR:

ING. NUMA POMPILIO JIMÉNEZ CORTEZ

NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, jueves 5 de junio de 2025, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 4:00 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 Interino


Firma


2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario


Firma

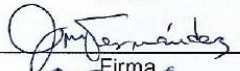


Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:


- ING. NUMA POMPILIO JIMÉNEZ CORTEZ
(Docente Asesor)


Firma

- ING. JOSÉ MIGUEL HERNÁNDEZ


Firma

- MSC. LUIS ROBERTO CHEVEZ PAZ


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE REDES DE TIERRA DE SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

A cargo de los Bachilleres:

- REYES AGUILAR VLADIMIR STANLEY
- SÁNCHEZ YESCAS KEVIN ROLANDO

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 8.8
(*Ocho punto ocho*)

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por permitirme llegar al final de mi carrera universitaria y poder ser un profesional, por guiarme siempre por el buen camino y darme la sabiduría para entender que sus tiempos son perfectos.

A mi mamá Santos Irma Aguilar Avalos por estar siempre para mí y ser mi ejemplo de amor, por brindarme todo lo necesario para poder desarrollarme y ayudarme a ser mejor persona, a mi papá Andrés Reyes García por ser mi ejemplo perfecto que con responsabilidad y sacrificio se puede lograr todo lo que uno se propone en esta vida y por impulsarme y orientarme siempre para crecer académicamente.

A mis hermanos, Diana, Indira y Genry, por ser modelos de profesionales a seguir que me impulsaron para lograr mis objetivos, por apoyarme en todo momento y ser un pilar fundamental en la familia para que tuviera las herramientas necesarias en mi carrera.

A mi novia, Jennifer Rodríguez, por formar parte de este proceso, por ser mi mejor amiga y mi apoyo incondicional, por estar conmigo, ayudarme y alentarme en los momentos que más lo necesitaba.

A mis demás familiares, gracias por siempre creer en mí y brindarme su apoyo.

A mi compañero de tesis, Kevin, con quien formamos un excelente equipo de trabajo por ser una gran persona y asumir este reto con el mismo compromiso y responsabilidad para obtener los mejores resultados posibles.

A Reinita Vides, por todo el apoyo y cariño brindado este tiempo, que Dios la guie y proteja siempre y le permita seguir ayudando a más personas por muchos años.

A nuestro docente asesor, Ing. Numa Jiménez, gracias por compartir con nosotros todo su conocimiento y experiencias profesionales que aportaron en gran manera para que este proyecto tuviera éxito.

Vladimir Stanley Reyes Aguilar

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradecer a Dios por darme la oportunidad de culminar mis estudios, por brindarme su protección y ayudarme en cada momento de mi carrera hasta ser un profesional y llenarme de muchas bendiciones.

A mi familia por apoyarme desde el primer momento, y a lo largo de todos estos años sin duda han sido una parte fundamental para lograr cada una de mis metas, a mis padres Ana Isabel Yescas Ocotan y Miguel Ángel Sánchez Bernardino por motivarme en todo momento, brindándome su apoyo y su cariño ayudándome a ser mejor en cada etapa de mi vida, no queda más que agradecerles por ayudarme a convertirme en un profesional. A mi hermana por ser un apoyo importante en los momentos más difíciles de la carrera, le deseo lo mejor en su vida y su etapa como profesional.

A mis compañeros que me han acompañado en este proceso, compartiendo su conocimiento y apoyo en cada nivel de la carrera. A mi compañero Stanley con el cual formamos un buen grupo de trabajo, por sus aportaciones a través del trabajo de graduación en el cual fue un apoyo fundamental.

Al representante de Eaton en El Salvador, Carlos Fuentes por su valiosa contribución al brindarnos las licencias para poder usar el programa CYMGRD, el cual es un software especializado para el diseño de redes de tierra complejos, con el que se pudo realizar las simulaciones y desarrollo final de la tesis.

A las empresas AES Y ETESAL por impartirnos las charlas técnicas sobre el diseño de redes de puesta a tierra en El Salvador, aportando su experiencia desarrollada a través de los años implementando soluciones de ingeniería las cuales han resultado en buenas prácticas de diseño. A ETESAL por brindarnos una demostración sobre la medición de la red de tierra de la subestación de Soyapango la cual se realizó de manera clara y precisa. A nuestro estimado Docente Ingeniero Numa Pompilio Jiménez Cortez por ser nuestro mentor desde el inicio de este proceso.

Kevin Rolando Sánchez Yescas

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	2
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 Objetivo general.....	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
1.2 ALCANCES.....	2
1.3 ANTECEDENTES.....	3
1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.6 RESULTADOS ESPERADOS	4
1.7 Conceptos básicos	5
CAPÍTULO 2: MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS Y ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA	8
2.1 Modelado de una cuadrícula de puesta a tierra.....	8
2.2 Electrodo de puesta a tierra	10
2.3 Medios de conexión a electrodos.....	10
2.4 Requerimientos de barras.....	11
2.5 Tipos de electrodos.....	11
2.5.1 Barras	12
2.6 Conexiones.....	13
2.7 Comportamiento de electrodos de tierra	13
2.8 Efecto de la forma, tamaño y posición del electrodo	14
2.8.1 Incremento de la profundidad de enterramiento de una barra vertical en suelo uniforme.....	14
2.8.2 Incremento de longitud de un conductor horizontal.....	17
2.8.3 Incremento de la longitud del lado de una plancha o malla de tierra cuadrada.	17
2.8.4 Efecto de proximidad.....	18
2.9 Resistividad del terreno.....	19

CAPÍTULO 3: PRINCIPALES PROBLEMAS DEL CONTROL DEL GPR, POTENCIALES DE TOQUE Y DE PASO EN SUBESTACIONES	20
3.1 Valores de corrientes tolerables - Efecto de la magnitud y duración	21
3.2 Efecto de la unión equipotencial para el efecto de control de GPR de una subestación	22
3.3 Factor de división de corriente	22
3.4 Corriente de cuadrícula máxima.....	23
3.5 Procedimiento	23
3.6 Tipos de falla de tierra.....	24
3.7 Efecto de la resistencia de tierra de la subestación	26
3.8 Efecto de la resistencia de falla	26
3.9 Efecto de los cables de tierra aéreos y conductores neutros.....	26
3.10 Neutro corrido multiaterrizado.....	26
3.11 Efecto de la tubería y cables directamente enterrados.....	27
3.12 Cálculo del factor de división de corriente	27
3.13 Características físicas y modelo del terreno	30
3.14 Aspectos básicos para el diseño de una RPAT para subestaciones	30
3.15 Método utilizado para mediciones de resistividad.....	32
3.16 Método de solución al problema de alta resistividad de suelo.....	33
3.17 Normativas utilizadas para el diseño de redes de tierra	34
3.18 Software utilizado para simulación de redes de tierra	34
CAPÍTULO 4: SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE CASOS PRÁCTICOS, RED DE TIERRA DE SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN	35
4.1 Análisis paramétrico de sistemas de tierra.....	35
4.2 Análisis y simulación de un caso de una cuadrícula de puesta a tierra de la norma IEEE Std 80-2013 utilizando CYMGRD	50
4.2.1 Análisis del diagrama de contorno.....	53
4.2.2 Perfil de contorno.....	53
4.2.3 Líneas equipotenciales	56
4.3 Versión modificada de la cuadrícula en un suelo de dos capas	57
4.3.1 Perfil de contorno de la cuadrícula con menor separación del conductor	58

4.4 Análisis y simulación de Subestación Bululú – CLESA	59
4.5 Caso práctico Subestación Apopa – ETESAL.....	65
4.6 Características físicas de la cuadrícula	67
4.7 Datos y características de diseño proporcionados.....	68
4.8 Modelación de la cuadrícula de tierra en la SE Apopa-ETESAL con suelo uniforme. 70	
4.9 Modelación de la cuadrícula de tierra SE Apopa-ETESAL con suelo de dos capas	73
4.10 Resultados de los parámetros obtenidos en las simulaciones de suelo uniforme y suelo de dos capas con CYMGRD.....	78
4.11 Investigación y trabajo de campo	79
AGRADECIMIENTOS.....	87
CONCLUSIONES.....	87
BIBLIOGRAFÍA.....	89
ANEXOS.....	91

INTRODUCCIÓN

El diseño del sistema de puesta a tierra de una subestación es una tarea compleja. En cualquier subestación, un sistema de puesta a tierra tiene un papel muy importante ya que está directamente relacionado con la seguridad de las personas y es de vital importancia para garantizar la operación correcta de la subestación.

Un sistema de puesta a tierra debe estar diseñado de tal manera que bajo todas las condiciones de la falla no se exceda el máximo potencial de malla y de paso tolerable. Las técnicas analíticas utilizadas para los sistemas complejos de puesta a tierra también son complejas y requieren algunas suposiciones simplificadoras para que los programas de computación digital sean manejables.

El Método de Elementos Finitos, permite estudiar sistemas cuya complejidad hace impráctico o imposible su caracterización y solución como un sistema continuo. Dividiendo a los cuerpos de un sistema en una cantidad finita de elementos de manera que analizar cada uno de estos elementos sea más sencillo.

Existen normas y recomendaciones que al hablar de sistemas de puesta a tierra recopilan información para realizar un correcto diseño tales como el estándar IEEE Std 80-2013, IEEE Std 81-2012, IEEE Std 142-2007 y el Acuerdo SIGET 29-E-2000. En el cual se desarrolla de manera simple y sistematizada el método propuesto, abarcando temas importantes como: criterios de seguridad, criterios de diseño, aspectos legales y sugerencias que se deben tener en cuenta al implementar o construir cualquier sistema de puesta a tierra.

En el presente trabajo de investigación se hará uso del software CYMGRD para analizar el comportamiento de sistemas de puesta a tierra en condiciones de falla donde se hace presente el aumento del potencial de tierra (GPR) y los potenciales de toque y paso.

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

- Analizar el funcionamiento de redes de tierra de subestaciones de distribución en suelo homogéneo y de dos capas mediante el Método de Elementos Finitos usando el software CYMGRD.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la práctica de diseño de redes de tierra en subestaciones de distribución por las compañías eléctricas de El Salvador.
- Investigar los principales problemas de control del GPR, potenciales de toque y de paso en las subestaciones de distribución de El Salvador.
- Evaluar el efecto de la unión equipotencial de la red de tierra de la subestación con los conductores de guarda y neutro para el control del GPR, potencial de toque y potencial de paso.
- Analizar y simular redes de tierra de distribución en terrenos con resistividad homogénea y de dos capas.
- Comparar los resultados de la simulación con las herramientas académicas Actividad No. 131 y programa RPAT desarrollados en la EIE.

1.2 ALCANCES

- Investigar sobre la práctica de diseño de redes de tierra en subestaciones, el tipo de suelo y áreas en el cual se construyen los sistemas de tierra prácticos, los principales problemas que se tienen con el GPR, voltaje de toque y de paso, como también, las técnicas de mitigación efectivas en costo disponibles en El Salvador.

- Estudiar y aplicar el método de elementos finitos para la simulación de sistemas de puesta a tierra de subestaciones prácticos usando el software CYMGRD.
- Comparar los resultados de la simulación usando elementos finitos con las herramientas académicas utilizadas en la EIE.
- Redactar un artículo Paper para fortalecer la investigación científica.

1.3 ANTECEDENTES

En la Escuela de Ingeniería Eléctrica se han realizado investigaciones académicas y prácticas para el análisis, diseño y simulación de redes de tierra basadas en normas como la IEEE Std 80-2013, IEEE Std 142-2007 y otras. Algunas investigaciones se han realizado para aplicar conceptos básicos en la aplicación de métodos finitos al análisis y simulación de redes de tierra. En este proyecto se iniciará la aplicación de una herramienta industrial de última tecnología que se está introduciendo en la práctica de ingeniería de redes de tierra en El Salvador.

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se realizará una investigación teórica y de campo, para conocer aspectos prácticos de diseño, construcción y mantenimiento de redes de tierra por las compañías de distribución de energía, las cuales se enfrentan a terrenos con cierto grado de complejidad y valores variables de resistividad del suelo. También se utilizará el programa CYMGRD, que es usado en la empresa AES para la simulación por el Método de Elementos Finitos de cuadrículas de tierra prácticos. Se entrevistará al personal de ingeniería y de mantenimiento que tiene que ver con las redes de tierra de subestaciones en operación y proyecto. Se consultarán normas de la IEEE, artículos técnicos y literatura especializada. También se utilizará las herramientas RPAT y Actividad No. 131 utilizada en el curso de Diseño de Redes de Tierra, a fin de comparar los resultados obtenidos de simulación. Se utilizará muy activamente las normas de referencia IEEE Std 80-2013, IEEE Std 367-2012, Acuerdo de SIGET No. 29-E-2000 y otras normas técnicas de referencia.

1.5 JUSTIFICACIÓN

El análisis y diseño de redes de tierra en terrenos pequeños con niveles de corriente de falla moderados o altos imponen restricciones para la seguridad del personal y los equipos de control, protección y telecomunicaciones en las subestaciones, por lo que es pertinente investigar el desempeño de redes de tierra práctico considerando el incremento en las potencias de cortocircuito en subestaciones urbanas, como también, en subestaciones rurales. Ante la problemática es importante evaluar alternativas de mejora del desempeño de las cuadrículas de tierra utilizando técnicas económicas tales como la unión equipotencial de los conductores de guarda y de neutro, pozos de tierra y otras técnicas.

1.6 RESULTADOS ESPERADOS

- Obtener reportes de simulación usando la técnica de elementos finitos de casos prácticos de redes de tierra de subestaciones de potencia, con su respectivo análisis.
- Diseñar una red de tierra de una subestación de El Salvador
- Listar los principales problemas en el control del GPR, soluciones utilizadas y recomendaciones técnicas para futuras subestaciones.
- Brindar una descripción de los criterios y técnicas de diseño de redes de tierra para subestaciones de potencia que se aplican en El Salvador.

1.7 Conceptos básicos

- **Resistividad del terreno:** Es la resistencia eléctrica específica de un determinado material. Se designa por la letra griega rho minúscula (ρ) y se mide en ohmios metro ($\Omega \cdot m$).
- **Potencial de Paso:** Es la diferencia en el potencial superficial experimentado por una persona parada con los pies separados 1 m sin contactar ningún objeto puesto a tierra. Este potencial surge debido al aumento en el potencial de la superficie donde la persona se encuentra parada. De las diferentes situaciones de Shock que existen ésta es la menos peligrosa porque no implica a órganos vitales en la trayectoria de la corriente.
- **Potencial de Toque:** Es la diferencia de potencial entre el aumento de potencial de tierra (GPR) y el potencial de la superficie en el punto donde una persona está parada mientras al mismo tiempo está en contacto con una estructura puesta a tierra.
- **Factor de división de la corriente de falla (S_f):** Representa la relación inversa de la corriente simétrica de falla a la porción de corriente que fluye entre la cuadrícula de puesta a tierra y la tierra circundante.
- **Conexión equipotencial:** Interconexión eléctrica de partes conductoras realizado para mantener el equipo interconectado a un potencial eléctrico común, éste tiene además como intención brindar seguridad al personal que durante una contingencia se encuentre en contacto con cualquier equipo eléctrico o superficie metálica.
- **I_b :** Es la corriente de cuerpo (el cuerpo es parte del circuito accidental) en A.

- **Corriente asimétrica efectiva de falla:** Es el valor de la señal de corriente asimétrica, integrada sobre el intervalo de duración de la falla. (Ver figura 1.1)

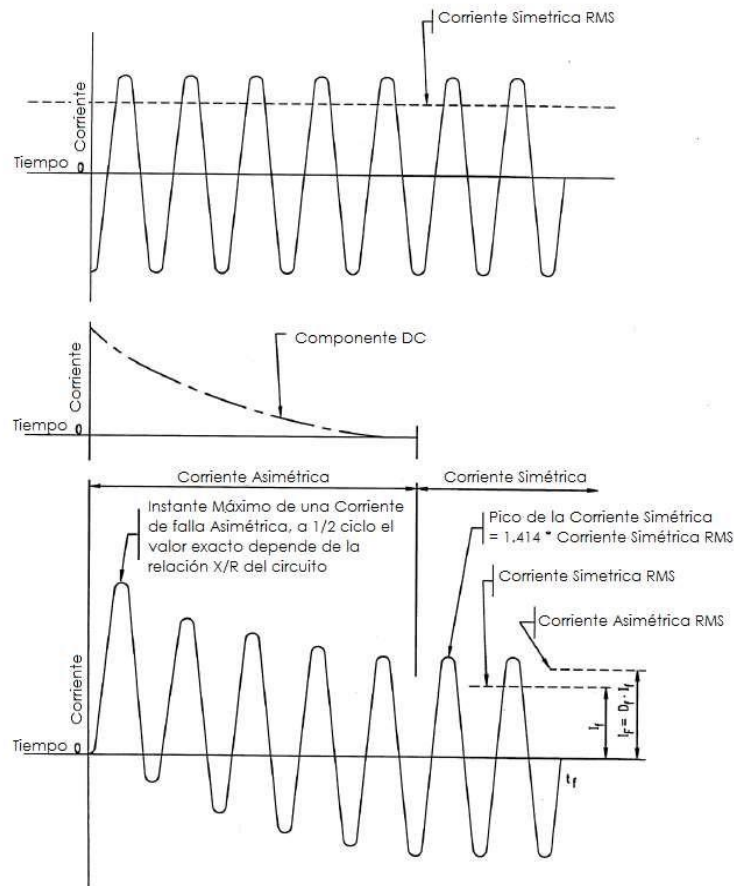


Figura 1.1. Relación entre los valores actuales de la corriente de falla y los valores de I_F , I_f y D_f para una duración t_f

$$I_F = D_f \cdot I_f \quad (1)$$

Donde:

I_F Corriente asimétrica durante la falla

I_f Corriente simétrica rms de de falla a tierra

D_f Factor de decremento

- **Aumento del potencial de tierra (GPR):** Es el potencial eléctrico máximo que la red de puesta a tierra de la subestación puede alcanzar respecto a un punto de puesta a tierra distante por el paso de una corriente de tierra I_G .

- **Factor de decremento:** Factor de ajuste usado en conjunto con la corriente simétrica de falla a tierra en los cálculos orientados a la seguridad de las puestas a tierra. Este determina el equivalente rms de la señal de corriente asimétrica para una determinada duración de la falla (t_f), y es tomado en cuenta para el efecto del offset DC y la atenuación de dicha componente durante la falla.
- **R_B :** Es la resistencia del cuerpo en Ω .
- **R_f :** Es la resistencia a tierra de un pie (ignorando la presencia del sistema de tierra de la subestación) en Ω .
- **Cuadrícula de puesta a tierra:** Sistema de electrodos de tierra horizontales que consiste en un conjunto de conductores desnudos enterrados, que proveen una tierra común para dispositivos eléctricos o estructuras metálicas, usualmente en una localización específica.
- **Material superficial:** Un material instalado sobre el suelo consistente de, pero no limitado a grava, asfalto o materiales hechos por el ser humano. El material superficial, dependiendo de la resistividad del material, puede impactar de forma significativa para limitar la corriente de cuerpo, el potencial de paso y de toque, donde los pies de la persona se ven involucrados.
- **Corriente de falla simétrica a tierra:** El máximo valor rms de corriente de falla después del instante de inicio de la falla a tierra. Como tal, representa al valor rms de la componente simétrica en el primer semiciclo de la onda de corriente que se desarrolla después del instante de la falla en el momento cero.

CAPÍTULO 2: MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS Y ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA

El Método de Elementos Finitos (FEM, del inglés Finite Element Method), es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy complejas utilizado en diversos problemas de ingeniería y física.

El FEM está pensado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. Se usa en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos y biológicos complejos. La variedad de problemas a los que puede aplicarse ha crecido enormemente, siendo el requisito básico que las ecuaciones constitutivas y ecuaciones de evolución temporal del problema sean conocidas de antemano.

2.1 Modelado de una cuadrícula de puesta a tierra

En el caso de las redes de puesta a tierra igualmente espaciadas, el voltaje de la malla se incrementará a lo largo de las mallas desde el centro hasta la esquina de la cuadrícula. Este incremento de voltaje depende del tamaño, espaciamiento de los conductores paralelos, del diámetro y profundidad de los conductores[1]. Todas estas son condiciones variadas y particulares.

El propósito de modelar una cuadrícula de puesta a tierra es conocer los gradientes de potencial de tierra a niveles de voltaje y corriente, de manera que los limita para evitar poner en peligro la seguridad de las personas y de los equipos bajo condiciones normales y de falla.

El método de cálculo tradicional del sistema de puesta a tierra utiliza enfoques analíticos en el que el suelo se considera como medio uniforme y los electrodos se consideran como simétricos. Si la proximidad uniforme del suelo no es óptima y los electrodos contienen irregularidades, dichos métodos pueden dar como resultado un sistema de puesta a tierra inseguro o mal diseñado.

El FEM, se ha utilizado como un excelente método numérico para calcular el sistema de puesta a tierra. Con fines prácticos, es apropiado delimitar la región de estudio con conductores perfectos que sirven como fronteras, las cuales tienen potenciales constantes y equivalen a una tierra remota. Esto convierte a la determinación del campo y el potencial eléctrico o densidad de carga en las superficies que forman la frontera.

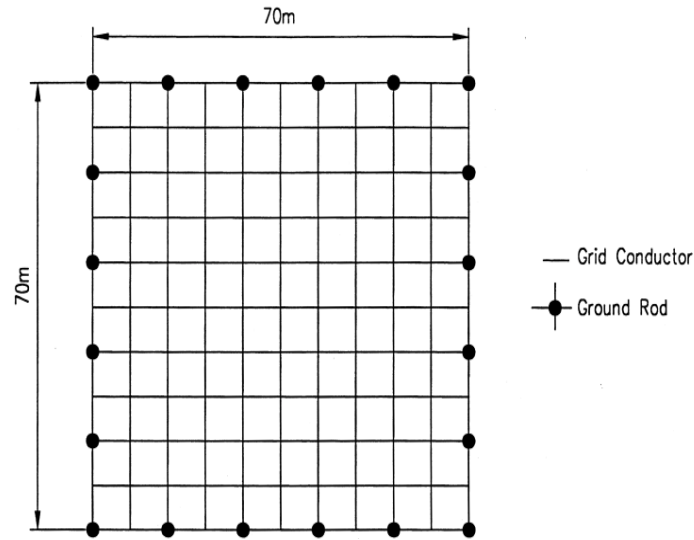


Figura 2.1. Ejemplo de cuadrícula de tierra de una subestación

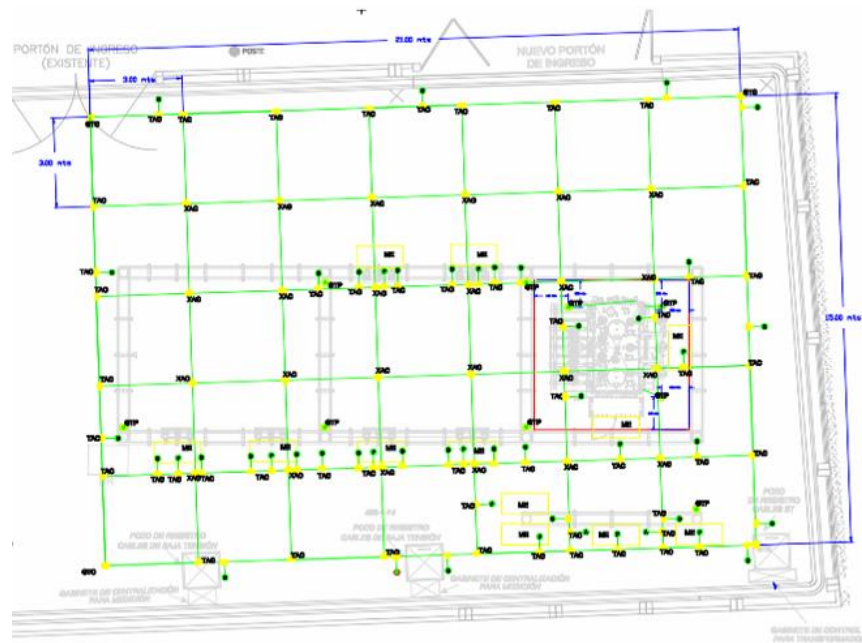


Figura 2.2. Ejemplo vista general mallas de subestación

2.2 Electrodo de puesta a tierra

Cuando se utilicen electrodos artificiales, estos deberán penetrar, tanto como sea posible por debajo de un nivel de humedad permanente.

El electrodo de puesta a tierra deberá ser permanente y adecuado para el sistema eléctrico de que se trate. En todos los casos, los electrodos de puesta a tierra deberán ser de cobre u otros metales o aleaciones que minimicen la corrosión durante su vida útil prevista. Toda la superficie externa de los electrodos deberá ser conductora, esto es, que no tenga pintura, esmalte u otra cubierta aislante[3]. La cantidad y tamaño de los electrodos a seleccionar deberá considerar sus limitaciones de descarga de corriente y no deberán ser menores de 2.40 m de longitud y 12.70 mm de diámetro. La separación entre electrodos debe ser por lo menos igual a la longitud de los mismos. Generalmente en El Salvador se utilizan varillas de 15.88 mm x 3.05 m de acero recubierto de cobre bajo norma NEMA.

2.3 Medios de conexión a electrodos

Hasta donde sea posible, las conexiones a los electrodos deberán ser accesibles. Los medios para hacer estas conexiones deberán proveer la adecuada sujeción mecánica, permanencia y capacidad de conducción de corriente, tal como los siguientes:

- Una abrazadera, accesorios o soldadura permanentes y efectivos.
- Un conector de bronce con rosca, que penetre bien ajustado en el electrodo.

En general, la resistencia de tierra de cualquier electrodo primario depende de la resistividad del suelo y el tamaño y tipo de disposición de todos los conductores individuales que comprenden el electrodo de tierra[1]. En disposiciones más complejas con alambres entrecruzados y un gran número de varillas en la misma área, la resistencia mutua entre elementos individuales juega un papel importante.

2.4 Requerimientos de barras

Los requerimientos mínimos que las barras deben cumplir se establecen de acuerdo a los distintos estándares, normas y reglamentos de los cuales se tienen los siguientes:

- Líneas de Distribución por Estándar SIGET 15.88 mm x 2.44 m
- NEC 15.88 mm x 2.44 m
- SIGET Acuerdo No 29-E-2000 12.70 mm x 2.40 m

Material	Diámetro	Longitud
Copperweld	12.70 mm	2.44 m
Acero Galvanizado	15.88 mm	3.05 m
Cobre	17.30 mm	3.70 m
Acero Inoxidable	23.20 mm	4.20 m

Tabla 2.1 Algunas características de barras de tierra

Ejemplo de una barra de puesta a tierra:



Figura 2.3. Barra de acero recubierta de cobre 15.88 mm x 2.44 m

2.5 Tipos de electrodos

El electrodo puede tomar diversas formas: barras verticales, placas y conductores horizontales. Siendo la principal forma empleada las barras de acero recubiertas de cobre que se detallan a continuación:

2.5.1 Barras

Esta es la forma más común de electrodos, porque su costo de instalación es relativamente barato y pueden usarse para alcanzar en profundidad, suelo de baja resistividad, sólo con excavación limitada y relleno. Están disponibles en diversos tamaños, longitudes, diámetros y materiales. La barra es de cobre puro o de acero recubierto de cobre. El tipo recubierto se usa cuando la barra se entierra por medios mecánicos (impacto) ya que el acero usado tiene alta resistencia mecánica. La capa de cobre debe ser de alta pureza y aplicada electrolíticamente. Esto último asegura que el cobre no se deslice al enterrar la barra.

En condiciones de suelo más agresivo, por ejemplo, cuando hay alto contenido de sal, se usan barras de cobre sólido. Las barras de acero inoxidable son más anódicas que el cobre y se usan ante riesgo de corrosión galvánica. Sin embargo, debe considerarse el hecho que el acero inoxidable tiene baja capacidad de transporte de corriente en comparación con el cobre.

Las barras cortas (típicamente hasta 3 metros de largo) se instalan a menudo empleando un martillo pesado (combo) operado manualmente[10]. Los golpes relativamente cortos y frecuentes son más efectivos normalmente. Las barras están acondicionadas con una cabeza endurecida y una punta de acero para asegurar que la barra misma no se dañe durante el proceso.

El diámetro de la barra es el principal factor que incide en el esfuerzo necesario para instalarla. Las barras delgadas se instalan relativamente fácil, pero a medida que la longitud de la barra aumenta, el diámetro de la barra debe incrementarse para asegurar que la barra tenga suficiente resistencia mecánica-particularmente en los puntos de unión. Al duplicar el diámetro de la barra, aumenta la resistencia mecánica para impacto en más de tres veces.

Las barras de acero recubiertas de cobre son significativamente más resistentes que las barras de cobre sólido, las cuales se doblan muy fácilmente y pueden quebrarse cuando se intenta introducir las en el suelo rocoso.

Debido a que la barra de cobre sólido tiene una mejor conductividad que la barra recubierta de cobre, esto mejora aún más el beneficio obtenido por el uso de barras largas. Si se entierran mecánicamente a dicha profundidad, las barras necesitarían ser de mucho mayor diámetro y puede ser necesaria una barra de acero recubierta de cobre para proveer la resistencia mecánica adecuada.

Las barras verticales largas pueden proporcionar una solución económica en muchas situaciones.

2.6 Conexiones

Los electrodos de tierra tienen que ser conectados entre sí de alguna manera y es normal que sea vía cobre desnudo si es posible, ya que esto ayudará a reducir el valor de impedancia global. Las conexiones entre los diferentes componentes deben ser mecánicamente robustas, tener buena resistencia a la corrosión y baja resistividad eléctrica. Es prudente evitar uniones y conexiones innecesarias. Debe considerarse el valor de corriente de falla y la duración de la falla que se espera que soporte el sistema de tierra.

2.7 Comportamiento de electrodos de tierra

El diseñador de un sistema de puesta a tierra se enfrenta normalmente con dos tareas tal como se define en [10].

- Lograr un valor requerido de impedancia.
- Asegurar que los voltajes de paso y contacto son satisfactorios.

En la mayoría de los casos habrá necesidad de reducir estos valores. Inicialmente, el diseñador debe concentrarse en obtener un cierto valor de impedancia. Este valor puede haber sido definido por consideraciones de protección. Los factores que influyen la impedancia son:

- Las dimensiones físicas y atributos del sistema de electrodos de tierra.
- Las condiciones del suelo (composición, contenido de agua, etc).

Es importante reconocer que las características del terreno afectan fuertemente el comportamiento del sistema de puesta a tierra. La característica más importante del terreno es su resistividad, que se mide en $\Omega \cdot m$.

Dado que la tierra tiene un tamaño (relativamente) infinito en comparación con los sistemas de puesta a tierra tal y como los conocemos, también lo es su capacidad para absorber un suministro prácticamente ilimitado de corriente. En la práctica, sin embargo, esta corriente ilimitada a la tierra se transmite a través de la interfaz electrodo metálico-suelo de una manera que se describe mejor de la siguiente manera:

Alrededor de un electrodo de puesta a tierra, la resistencia del suelo es la suma de las resistencias en serie de las capas virtuales de tierra, situadas progresivamente hacia el exterior de la varilla. La capa más cercana a la varilla tiene la menor superficie circunferencial o sección transversal, por lo que tiene la mayor resistencia. Las conchas sucesivas fuera de ésta tienen áreas progresivamente mayores y, por tanto, resistencias progresivamente menores. A medida que aumenta el radio desde la varilla, la resistencia incremental por unidad de radio disminuye hasta casi cero.

2.8 Efecto de la forma, tamaño y posición del electrodo

Una parte dominante de la impedancia se debe a la orientación física de los electrodos de tierra. Los gráficos de las siguientes figuras ilustran el efecto que pueden tener los cambios en estas dimensiones sobre la impedancia y capacita al diseñador para estimar el mérito relativo de cada opción. Esto se discute con más detalle a continuación:

2.8.1 Incremento de la profundidad de enterramiento de una barra vertical en suelo uniforme

La Figura 2.4 muestra el beneficio que puede obtenerse en suelos de diferente resistividad incrementando la longitud de la barra enterrada. También muestra que el mejoramiento por unidad de longitud disminuye a medida que la barra aumenta.

Sin embargo, el gráfico que ilustra el comportamiento en suelo uniforme no cuenta la historia completa.

El decrecimiento en resistencia obtenido mediante una barra larga puede ser particularmente deseable en condiciones de suelo no uniforme. La Figura 2.5 demuestra el mejoramiento posible en la resistencia de electrodo cuando se incrementa la longitud de una barra en un suelo que consiste de tres capas. Las capas superiores son de resistividad relativamente alta hasta una profundidad de seis metros. La resistencia de la barra es alta hasta que su longitud supera estas capas, debido a la alta resistividad del suelo que la rodea.

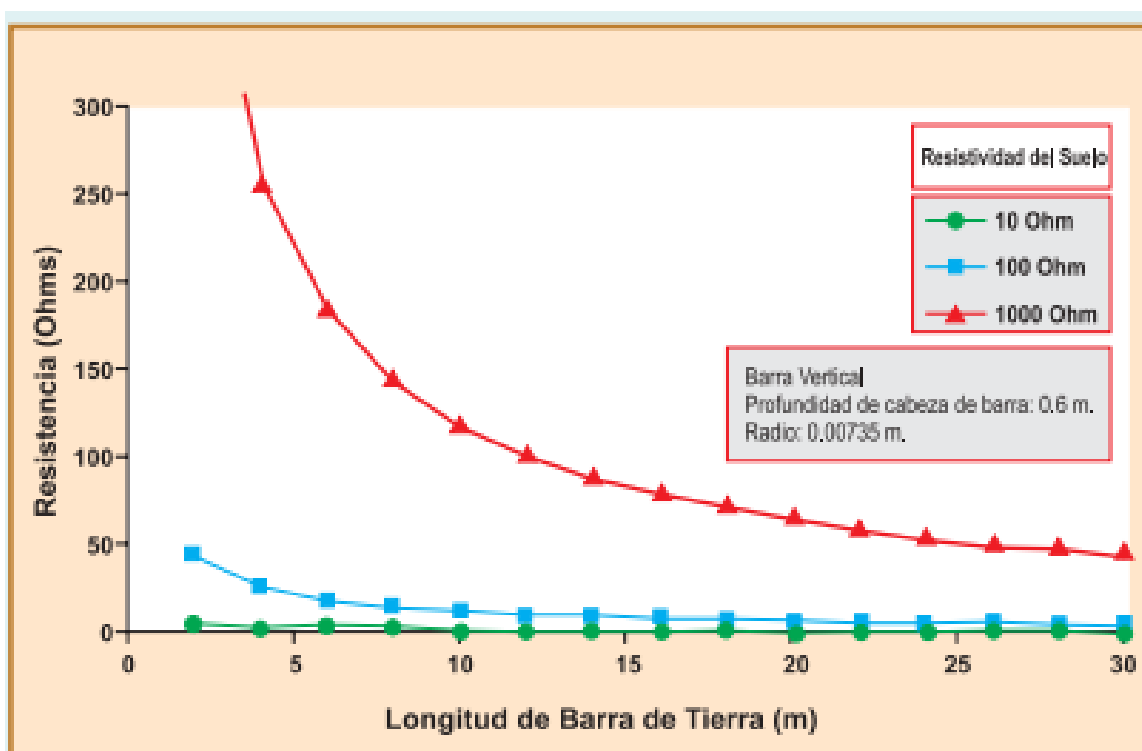


Figura 2.4. Resistencia vs longitud de barra

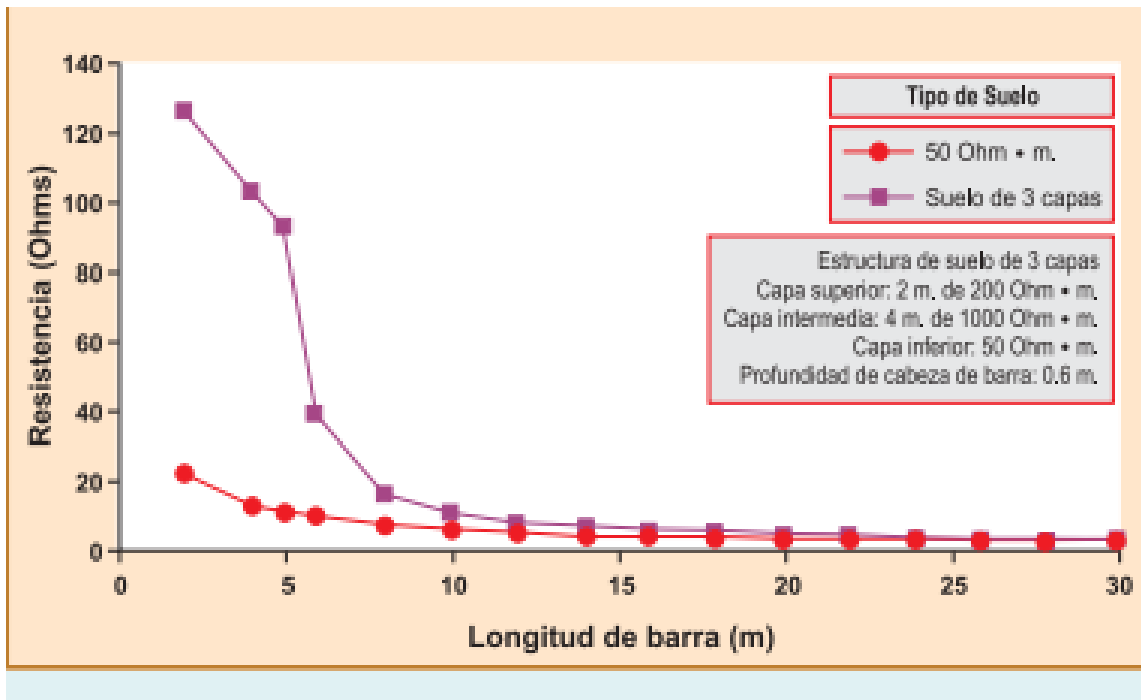


Figura 2.5. Resistencia vs longitud de barra en suelo estratificado

A medida que la longitud de la barra aumenta, la resistencia total baja más rápido. Esto se debe a la capa más profunda con mejores propiedades eléctricas. En este caso es clara la mejoría de comportamiento con cada metro adicional de barra instalada, mucho mayor a esta profundidad que para barra en suelo uniforme.

Una vez que la barra alcanza aproximadamente 15 m de longitud, hay poca diferencia en la resistencia de una barra en esta estructura de suelo, comparada con otra en un suelo uniforme de $50 \Omega \cdot m$ de resistividad. Sin embargo, el mejoramiento por unidad con cada metro adicional instalado comienza a reducirse rápidamente en el caso de suelo uniforme. En algunas condiciones de terreno, particularmente donde existe un área disponible limitada, el empleo de barras verticales puede ser la opción más efectiva, pero depende de la estructura del terreno.

Finalmente, es importante notar que las barras verticales otorgan un grado de estabilidad a la impedancia del sistema de puesta a tierra. Normalmente deben ser de longitud suficiente de modo que estén en o cerca de napas de agua (si existen a profundidad razonable en el lugar).

2.8.2 Incremento de longitud de un conductor horizontal

La Figura 2.6 muestra el beneficio que puede obtenerse en suelos de diferente resistividad, incrementando la longitud de un electrodo de tierra tendido horizontalmente a una profundidad de 0.6 m. Debe notarse que el cálculo en este ejemplo no considera la impedancia lineal del conductor, de modo que los valores son optimistas en el caso de grandes longitudes. Normalmente, el mejoramiento por unidad de longitud disminuye a medida que la longitud del electrodo aumenta.

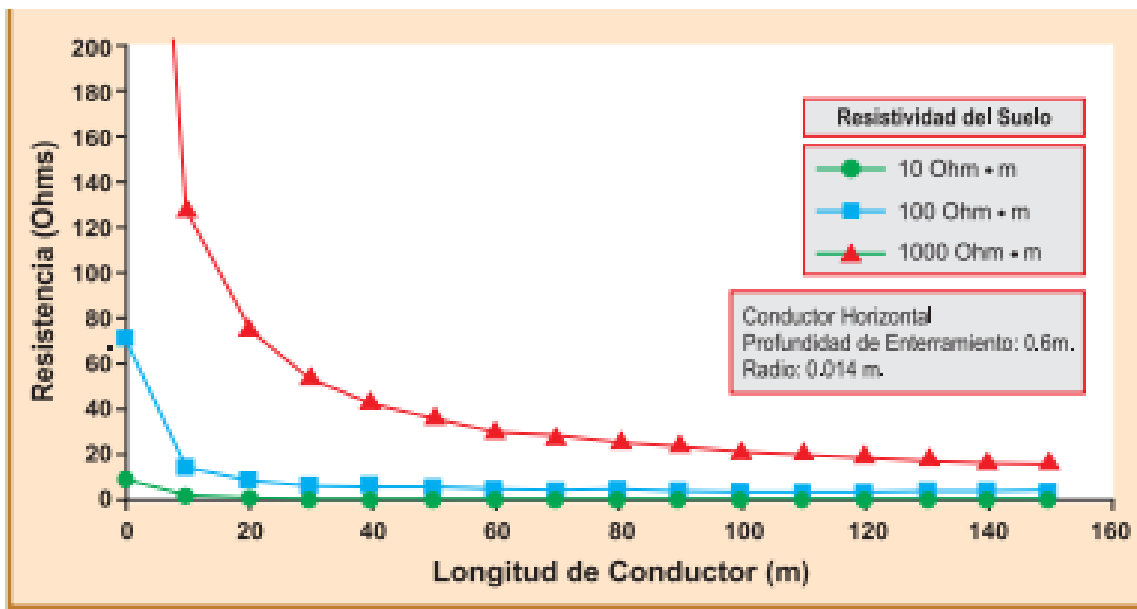


Figura 2.6. Resistencia vs longitud del conductor horizontal

2.8.3 Incremento de la longitud del lado de una plancha o malla de tierra cuadrada

La Figura 2.7 muestra el beneficio que puede obtenerse en suelos de diferente resistividad incrementando el área abarcada por un electrodo cuadrado. A pesar de mostrar que el mejoramiento por unidad de área disminuye, la reducción en resistencia resulta aún significativa. En realidad esta es frecuentemente la forma más efectiva para reducir la resistencia de un electrodo de tierra.

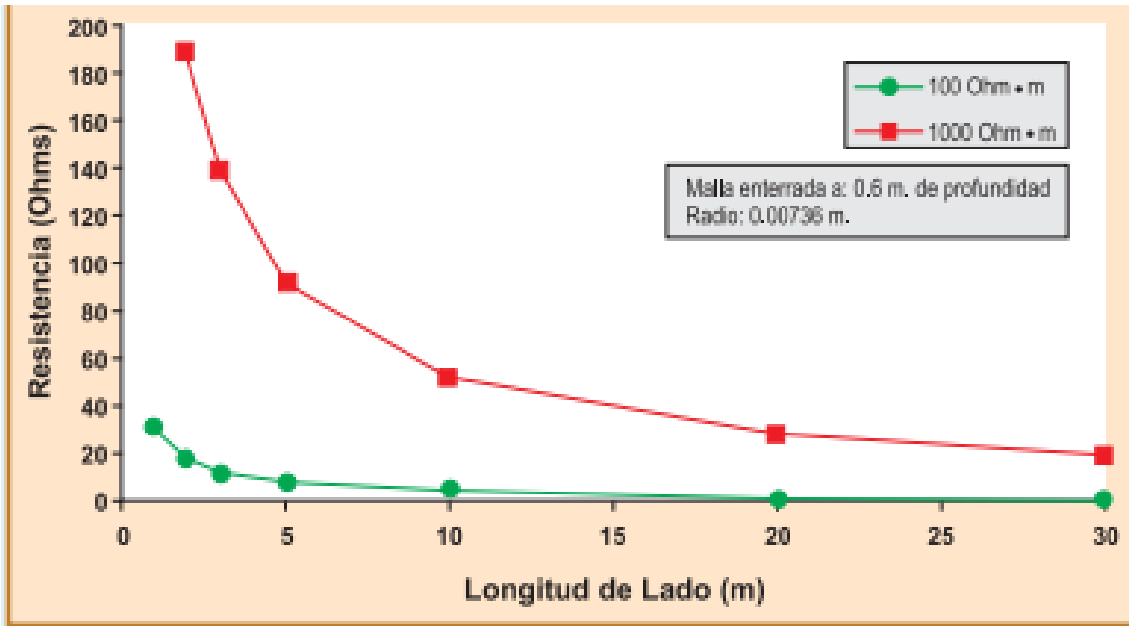


Figura 2.7. Resistencia vs longitud del lado de cuadrícula cuadrada

2.8.4 Efecto de proximidad

Si dos electrodos de tierra se instalan juntos, entonces sus zonas de influencia se traslapan y no se logra el máximo beneficio posible. En realidad, si dos barras o electrodos horizontales están muy próximos, la impedancia a tierra combinada de ambos puede ser virtualmente la misma que de uno solo, lo cual significa que el segundo es redundante. El espaciamiento, la ubicación y las características del terreno son los factores dominantes en esto.

La Figura 2.8 muestra cómo la resistencia total de dos barras verticales de 5 m de longitud, cambia a medida que la distancia entre ellas aumenta. De esta figura puede verse que las barras debieran estar separadas una distancia superior a 4 m en suelo uniforme. Los cálculos de este tipo son la base para establecer la práctica de instalar electrodos a menos con una separación equivalente a su longitud.

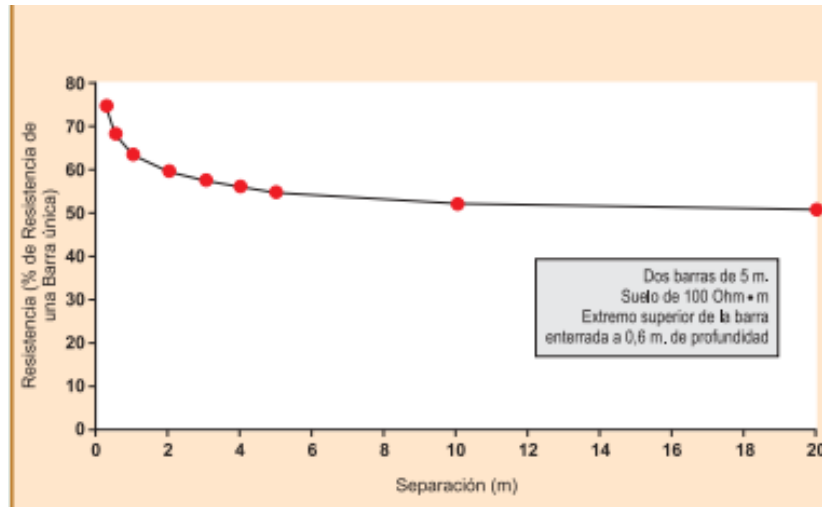


Figura 2.8. Resistencia combinada de dos barras verticales

2.9 Resistividad del terreno

El factor restante de mayor importancia que afecta la impedancia del sistema de tierra es la impedancia del medio en el cual está situado el electrodo, es decir, el terreno. Debido a que la resistividad del terreno es un factor de suma importancia en el comportamiento de electrodos de tierra, necesita discutirse en más detalle. La resistividad del terreno se expresa en $\Omega \cdot m$.

El contenido de agua tiene una influencia importante en la resistividad del terreno y luego en el comportamiento del sistema de tierra. Un incremento en el contenido de agua provoca una reducción drástica de la resistividad, hasta alcanzar un 20% del nivel original cuando el efecto tiende a estabilizarse. Minerales y sales disueltas en el agua pueden ayudar a reducir aún más la resistividad, particularmente cuando están produciéndose en forma natural y no terminan diluyéndose con el tiempo.

Valores típicos de resistividad de diferentes suelos			
Tipo	Resistividad (ohm-metro)		
Agua de mar	0,1	-	1
Tierra vegetal/arcilla húmeda	5	-	50
Arcilla, arena y grava	40	-	250
Creta (tiza) porosa	30	-	100
Piedra caliza cristalina	300	+	
Roca	1 000	-	10 000
Roca ígnea	2 000	+	
Concreto seco	2 000	-	10 000
Concreto húmedo	30	-	100
Hielo	10 000	-	100 000

Tabla 2.2. Algunas resistividades típicas de suelo

CAPÍTULO 3: PRINCIPALES PROBLEMAS DEL CONTROL DEL GPR, POTENCIALES DE TOQUE Y DE PASO EN SUBESTACIONES

El GPR es la máxima elevación de potencial de una puesta a tierra respecto de una puesta a tierra remota, cuando fluye a través de ella una corriente desde o hacia el terreno. La magnitud del GPR dependerá de la interconexión equipotencial que exista entre los diferentes elementos que formen parte del sistema de puesta a tierra incluyendo cables de guarda, neutro etc.

$$GPR = I_G \cdot R_g \quad (2)$$

Donde:

I_G es la corriente máxima de cuadrícula en A

R_g es la resistencia de la malla en Ω

Los potenciales de toque y de paso son parámetros importantes porque indican las dos formas en las cuales una persona puede sufrir una descarga eléctrica al entrar en contacto directo con un equipo energizado. La tensión de paso se produce cuando una persona está de pie en las cercanías del sistema de puesta a tierra cuando el sistema esté operando, es decir despejando una falla producida.

La seguridad de una persona depende de la prevención de la cantidad crítica de voltaje de choque sea absorbida antes de que la falla se despeje y el sistema se desenergice. Los voltajes máximos de conducción de cualquier circuito accidental se definen mediante las siguientes ecuaciones establecidas en [1].

$$E_{step} = (R_B + 2R_f)I_B \quad (3)$$

Para un peso del cuerpo de 50 kg:

$$E_{step50} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (4)$$

Para un peso del cuerpo de 70 kg:

$$E_{step70} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (5)$$

Similarmente, el límite del voltaje de toque es:

$$E_{touch} = \left(R_B + \frac{R_f}{2} \right) I_B \quad (6)$$

Para un peso del cuerpo de 50 kg:

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (7)$$

Para un peso del cuerpo de 70 kg:

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (8)$$

Donde:

E_{step} es el voltaje de paso en V

E_{touch} es el voltaje de toque en V

C_s está determinado de la Figura 11 o Ecuación (27) IEEE Std 80-2013

ρ_s es la resistividad del material superficial en $\Omega \cdot m$

t_s es la duración de la corriente de choque en s

Si no es usada la capa superficial protectora, entonces $C_s = 1$ y $\rho_s = \rho$.

3.1 Valores de corrientes tolerables - Efecto de la magnitud y duración

La circulación de corriente eléctrica a través del cuerpo humano puede inducir una variedad de efectos fisiológicos, cuya severidad depende directamente de la intensidad de la corriente eléctrica a la que la persona está expuesta en un momento dado. A continuación, se presenta una tabla que resume los rangos típicos de corriente y los efectos biológicos asociados a cada nivel de exposición.

I = 1 mA	La corriente de 1 mA se reconoce generalmente como el umbral de percepción; es decir, la magnitud de la corriente a la que una persona es capaz de detectar.
1 ≤ I ≤ 6 mA	A menudo denominadas corrientes "de poder soltar" (let-go), aunque desagradables para sostener, en general, no

	ponen en peligro la capacidad de una persona de sostener un objeto con energía para controlar sus músculos y soltarlo.
$9 \leq I \leq 25 \text{ mA}$	Las corrientes pueden ser dolorosas y pueden que sea difícil o imposible de soltar los objetos energizados agarrados con la mano.
$60 \leq I \leq 100 \text{ mA}$	Se alcanza la fibrilación ventricular, paro del corazón, o la inhibición de la respiración lo cual puede causar lesiones o la muerte.
$I > 1 \text{ A}$	Daños masivos en tejido que pueden producir la muerte.

Tabla 3.1 Valores de corrientes tolerables

3.2 Efecto de la unión equipotencial para el efecto de control de GPR de una subestación

Para el estudio del GPR se relacionan los siguientes parámetros a tomar en cuenta:

- Factor de división de corriente.
- Valor de I_g .
- Tipo de falla.
- Cables de guarda y de neutro.
- Valor de la resistencia de tierra de la subestación.

3.3 Factor de división de corriente

Es un factor que representa la relación la inversa de la corriente de falla simétrica a la porción de la corriente que fluye entre la red de tierra y el suelo circundante.

$$S_f = \frac{I_g}{3I_0} \quad (9)$$

Donde:

S_f es el factor de división de corriente

I_g es la corriente de cuadrícula máxima simétrica en RMS en A

I_0 es la corriente de secuencia cero en A

3.4 Corriente de cuadrícula máxima

Un valor de diseño de la corriente de cuadrícula máxima definida como sigue:

$$I_G = D_f \cdot I_g \quad (10)$$

Donde:

I_G es al corriente de cuadrícula máxima en A

D_f es el factor de decremento para la duración de la falla t_f

I_g es la corriente de cuadrícula simétrica en A

3.5 Procedimiento

En la mayoría de casos, el valor más grande de corriente de cuadrícula da la condición más peligrosa[1]. Para estos casos, los siguientes pasos están involucrados en determinar el valor de diseño correcto de la corriente de cuadrícula máxima I_G para uso en los cálculos de puesta a tierra de la subestación:

- a) Evaluar el tipo y localización de aquellas fallas de tierra que están probablemente produciendo el flujo más grande de corriente entre la cuadrícula de tierra y la tierra de alrededor, y entonces el GPR más grande y los gradientes de potencial superficial local más grande en el área de la subestación.
- b) Determinar, por cálculo, el factor de división de corriente de falla S_f para los cálculos seleccionados en a), y establecer los valores correspondientes para la corriente de cuadrícula simétrica I_g .
- c) Para cada falla, basada en su tiempo de duración t_f , determinar el valor del factor de decremento D_f permitido por los efectos de asimetría de la onda de corriente de falla. Seleccionar el producto más grande de $D_f \cdot I_g$, y entonces la peor condición de falla.

3.6 Tipos de falla de tierra

Mucho de los diferentes tipos de falla puede ocurrir en el sistema. Desafortunadamente, puede ser difícil determinar cuál tipo de falla y localización resultará en el flujo más grande de corriente entre la cuadrícula de tierra y el suelo.

En la determinación de los tipos aplicables de falla, se debe poner consideración a la probabilidad de ocurrencia de la falla. Es recomendable, por consideraciones prácticas, que la investigación sea confinada a fallas de una línea a tierra y de línea a línea con contacto con tierra.

En el caso de una falla de línea a línea con contacto a tierra, la corriente de falla de secuencia cero es:

$$I_0 = \frac{E(R_2 + jX_2)}{(R_1 + jX_1)[R_0 + R_2 + 3R_f + j(X_0 + X_2)] + (R_2 + jX_2)(R_0 + 3R_f + j3X_0)} \quad (11)$$

La corriente de secuencia cero para una falla de línea a tierra es:

$$I_0 = \frac{E}{X_1 + X_2 + X_0} \quad (12)$$

Corriente de cuadrícula máxima I_G para varias localizaciones de falla y configuraciones del sistema.

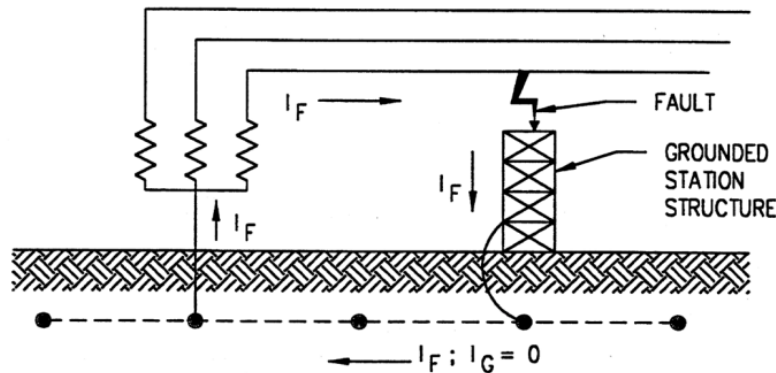


Figura 3.1. Falla local dentro de la subestación; neutro local aterrizado

En este caso se tiene una condición segura respecto al GPR debido a que la corriente de falla I_F que entra a la red de tierra es la misma que está saliendo a una de las fases falladas por tanto I_G es cero.

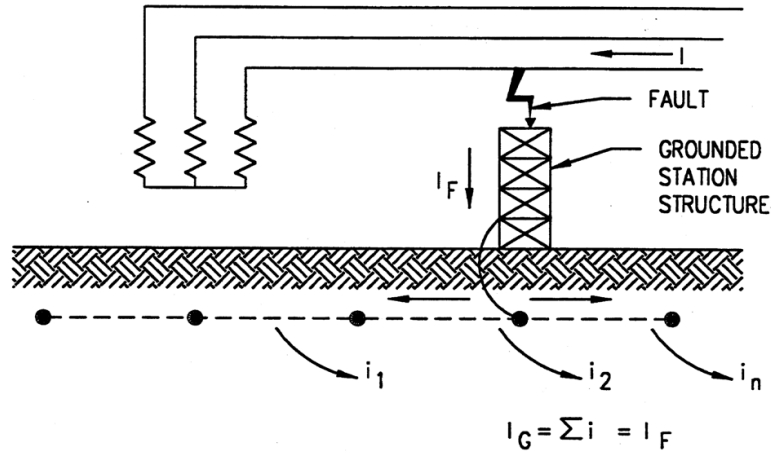


Figura 3.2. Falla dentro de subestación local; neutro aterrizado en un lugar remoto

En esta situación el devanado primario de la subestación local no es una fuente de corriente de secuencia cero, pero la subestación remota si tiene el neutro efectivo porque existe un valor no nulo de corriente de falla a tierra.

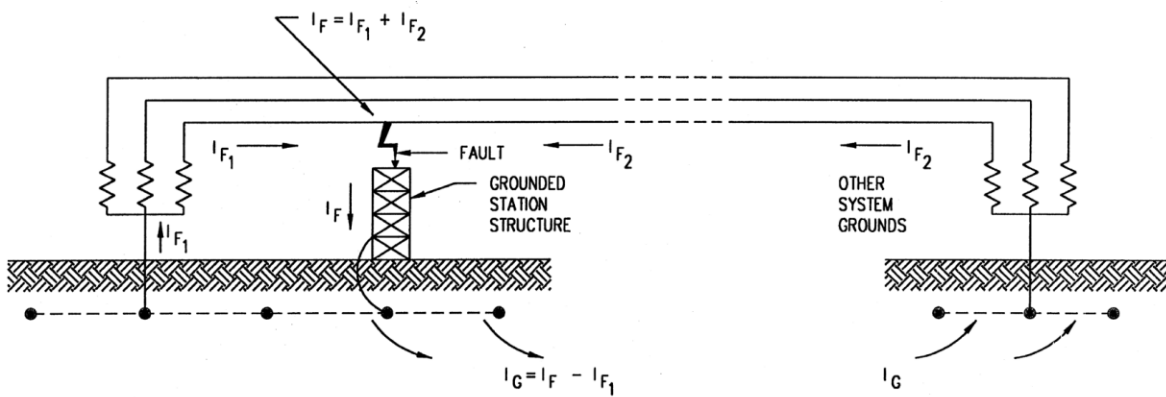


Figura 3.3. Falla en subestación; sistema aterrizado en la subestación local y también en otros puntos

En la figura 3.3 se observa que la corriente I_{F1} no contribuye al valor de I_G sino que solamente la corriente de falla de la fuente remota.

3.7 Efecto de la resistencia de tierra de la subestación

La resistencia de tierra R_g es sumamente importante ya que afecta la cantidad de corriente de falla que se puede drenar a tierra. A menor R_g se tiene un mayor valor de I_g y S_f , esto depende de la resistencia de tierra equivalente de los conductores de guarda y de neutro conectados a la red de tierra de la subestación.

3.8 Efecto de la resistencia de falla

Si la falla es una ruptura del aislamiento en la subestación local, la única suposición segura es que la resistencia de la avería se supone cero, es decir $R_f = 0$.

3.9 Efecto de los cables de tierra aéreos y conductores neutros

Cuando los cables de tierra o conductores neutros aéreos de la línea de transmisión están conectados a la tierra de la subestación, una parte sustancial de la corriente de falla a tierra se desvía de la cuadrícula de tierra de la subestación[1]. Cuando existe esta situación, los cables de tierra o conductores neutros aéreos deben tomarse en cuenta en el diseño de la cuadrícula de tierra. Conectando la tierra de la subestación a los cables de tierra o conductores neutros aéreos, o ambos, y a través de ellos las estructuras de las líneas de transmisión o postes de distribución, por lo general tienen el efecto global de aumentar la GPR en las bases de la torre, lo cual no afecta en general la seguridad del público.

3.10 Neutro corrido multiaterrizado

Todo sistema de distribución debe tener referencia a tierra, por la seguridad de las personas y de todos los equipos instalados en el mismo; por tanto, toda línea nueva o extensión de línea deberá construirse con neutro corrido, multiaterrizado, independientemente se construya o no, distribución eléctrica en baja tensión.

La característica del 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 1.6 km de línea[5].

Los sistemas de transmisión se diseñan con un neutro efectivamente conectado a tierra, donde la relación $X_0/X_1 \leq 3$, como es el caso del sistema de transmisión de El Salvador y de SIEPAC a 230 kV.

3.11 Efecto de la tubería y cables directamente enterrados

Los cables enterrados con sus fundas o blindaje en contacto efectivo con la tierra, y las tuberías metálicas enterradas unidas al sistema de tierra de la subestación y que se extiende más allá de su perímetro tendrán un efecto similar al de los cables de tierra y neutros[10]. Al conducir parte de la corriente de falla a tierra lejos de la subestación, el aumento potencial de la cuadrícula durante la falla y los gradientes locales en la subestación se verán algo reducidos.

3.12 Cálculo del factor de división de corriente

$$I_g = S_f \cdot (3I_0) \quad (13)$$

El proceso de cálculo consiste en derivar una representación equivalente de los cables aéreos de tierra, neutros, etc., conectados a la cuadrícula y luego resolver el equivalente para determinar qué fracción de la corriente total de falla fluye entre la cuadrícula y la tierra.

S_f es dependiente de algunos parámetros como:

- a) Localización de la falla.
- b) Magnitud de la impedancia de la cuadrícula de tierra de la subestación.
- c) Tuberías y cables enterrados en la vecindad o directamente conectados al sistema de tierra de la subestación.
- d) Los cables de tierra, neutros u otras vías de retorno de tierra aéreo.

- Si se tiene que S_f es igual a 1, indica que el 100% de la corriente de falla se va hacia la red de tierra de la subestación, debido a que no se tienen interconectados los conductores de guarda y de neutro con el sistema de puesta a tierra de la subestación.
- En el caso de que S_f sea de 0.5, indica que el 50% de la corriente de falla se va hacia la red de tierra de la subestación, y el otro 50% se drena a través de los conductores de guarda y de neutro, tuberías enterradas unidas de manera equipotencial.

Una de las maneras de calcular el factor de división de corriente es usando el método gráfico, conociendo la cantidad de conductores de neutro y de guarda y el tipo de falla local o remota[1].

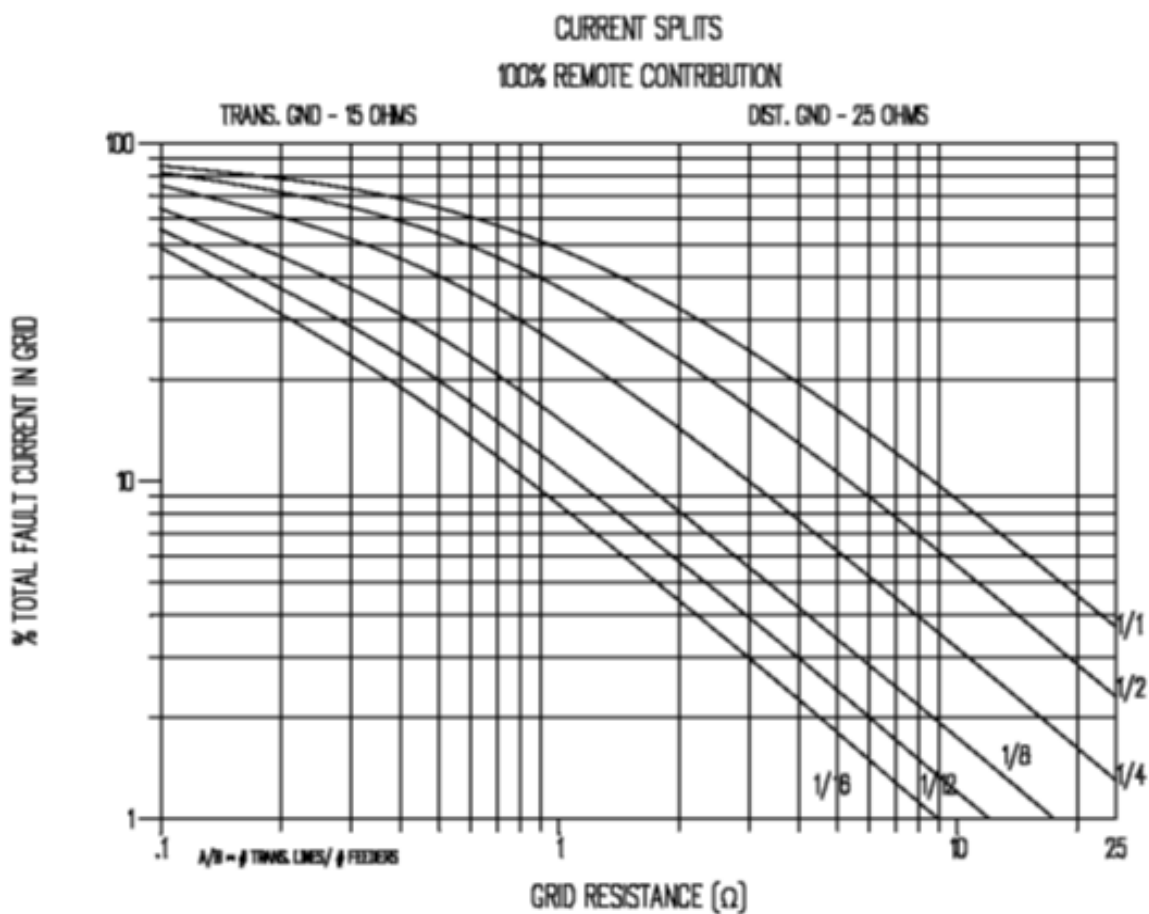


Figura 3.4. Curva C1 para aproximar el factor de división S_f

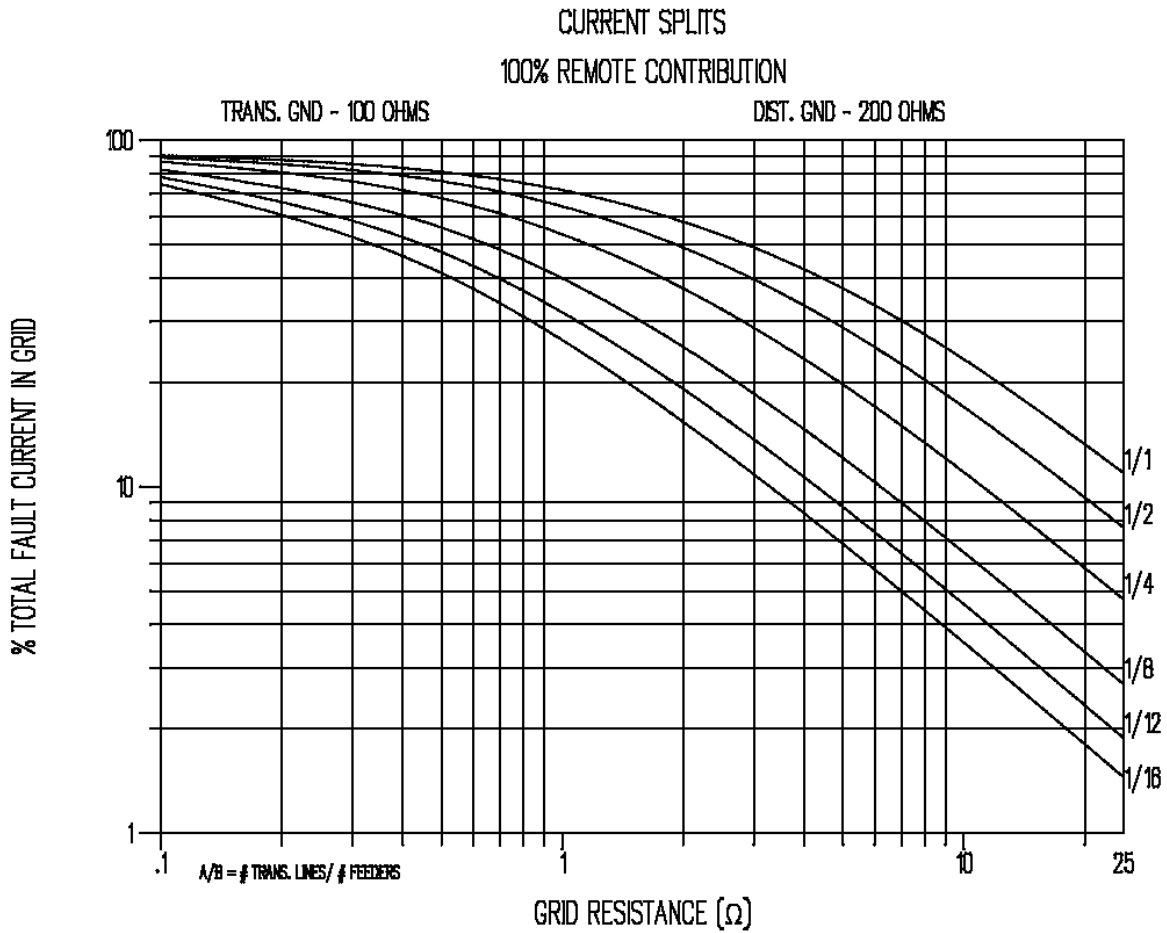


Figura 3.5. Curva C.2 para aproximar el factor de división S_f

Otro método es usando la tabla del anexo C de la norma IEEE Std 80-2013, la impedancia equivalente del cable estático aéreo y del cable de guarda de la subestación.

Number of transmission lines	Number of distribution neutrals	$R_{ig} = 15; R_{dg} = 25;$ $R + jX (\Omega)$	$R_{ig} = 100; R_{dg} = 200;$ $R + jX (\Omega)$
1	1	$0.91 + j0.485$	$3.27 + j0.652$
1	2	$0.54 + j0.33$	$2.18 + j0.412$
1	4	$0.295 + j0.20$	$1.32 + j0.244$
1	8	$0.15 + j0.11$	$0.732 + j0.133$

Tabla 3.2. Impedancia equivalente aproximada de línea de transmisión de cable de guarda de línea de transmisión y neutros de alimentadores de distribución

El factor de división de corriente S_f

$$S_f = \left| \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R_g} \right| \quad (14)$$

3.13 Características físicas y modelo del terreno

La dificultad de la implementación o construcción de un sistema de puesta a tierra depende directamente de la selección del terreno, ya que sus características y parámetros afectan en gran medida las variables más importantes a ser calculadas y con las cuales se procede a diseñar. Las variables o parámetros a tener en cuenta son:

- Área
- Resistividad

El área del sistema de puesta a tierra (A) es el factor más importante en la determinación de la resistencia del sistema de puesta a tierra (R_g). Entre mayor sea A , menor será R_g y, por lo tanto, es menor la elevación del potencial de tierra (GPR). La forma geométrica del terreno puede ser: cuadrada, rectangular, en forma de "L" o, de cualquier forma.

La resistividad (ρ) es otro factor importante para la determinación de R_g , el escoger un terreno con una alta resistividad dificulta el obtener una resistencia R_g baja.

Cuando el suelo presenta heterogeneidad significativa en su estructura, particularmente con contrastes marcados en las resistividades eléctricas entre distintas capas, es recomendable emplear un modelo de dos capas, caracterizado por resistividades aparentes ρ_1 y ρ_2 para mejorar la precisión en la interpretación de datos.

3.14 Aspectos básicos para el diseño de una RPAT para subestaciones

Mediante entrevistas realizadas con profesionales de ETESAL responsables del diseño de redes de tierra, se tienen los siguientes criterios básicos:

- Para la selección de conductores de cobre para puesta a tierra se hace uso de la ecuación 37 de la IEEE Std 80-2013 siendo el calibre ideal a utilizar 4/0 según la norma, pero con un mínimo recomendado de 2/0 por confiabilidad, aunque los cálculos realizados puedan dar resultados de calibres más delgados.
- Para incrementos futuros de la subestación, no se tiene un valor definido en cuanto al factor de seguridad, lo que se realiza es una proyección de cuánto podría ampliarse la subestación en un periodo de tiempo determinado.
- Instalar conductores y varillas formando un lazo perimetral de puesta a tierra ayuda para evitar concentraciones altas de corriente.
- La cuadrícula puede ser enterrada entre profundidades de 0.3 m a 0.5 m.
- Idealmente en instalaciones nuevas se maneja que la subestación funcionará con un transformador de potencia, pero se solicitan los estudios de cortocircuito proyectados al escenario que pueda en un tiempo estar funcionando un segundo transformador de potencia, con esto se logra un diseño más conservador y ayuda a minimizar costos a futuro al no tener la necesidad de realizar modificaciones grandes a la malla donde ya se contaría con la obra civil en la superficie.
- En los cruces de conductor debe existir un conector o soldadura exotérmica siendo esta última la más recomendada por su confiabilidad.
- En terrenos heterogéneos o de alta resistividad es recomendable colocar varillas más largas en el caso que el perfil del terreno resulte ser descendente.
- En casos de altas corrientes de cortocircuito una posible solución es usar calibres de conductores más robustos.
- El espesor de la capa superficial comúnmente está en el rango de 10 a 20 cm.
- Por lo general la separación de los conductores de la malla es de 3 m a 7 m para el diseño inicial. Reducir la separación de los conductores ayuda a mejorar los potenciales de toque y de paso.

- Los electrodos normalmente usados son: barras de 15.88 mm x 3.05 m, con un espesor de cobre de 300 micras.
- Para el diseño de una cuadrícula de seguridad de equipos de maniobra, generalmente se utiliza el tamaño de 1.2 m x 1 m, con mallas de 20 cm de separación.
- En el caso de una subestación que posee distintos niveles de elevación en su terreno, se construyen dos mallas de manera individual y posteriormente se conectan entre sí para evitar diferencias de potencial.

En conclusión, el diseño de cualquier instalación eléctrica prioriza ante todo la seguridad de las personas. Este es el principal requerimiento de diseño para un sistema de puesta a tierra.

Si bien el acuerdo 29-E-2000 de la SIGET establece los criterios de diseño, no considera los métodos y procedimientos para la medición y mantenimiento de las redes de tierra de distribución. También, es importante mencionar, que no existe una reglamentación o norma de SIGET para las redes de tierra en Subestaciones de Transmisión o Generación, por lo que para estos casos se recomienda utilizar las normas IEEE Std 80-2013, IEEE Std 81-2012 y la IEEE Std 665-1995.

3.15 Método utilizado para mediciones de resistividad

Las empresas del sector eléctrico en El Salvador utilizan el método de Wenner[2], el cual permite realizar los estudios de resistividad del suelo en las subestaciones.

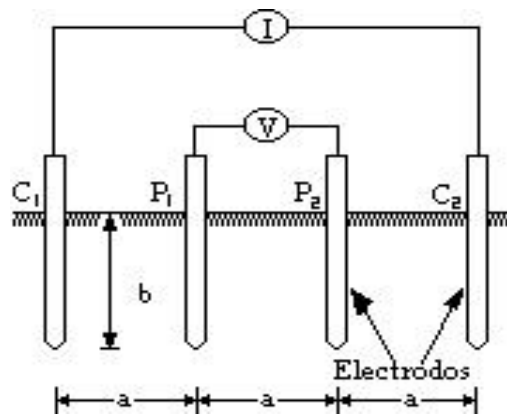


Figura 3.8. Esquema de disposición de electrodos para el estudio de resistividad de suelo

En la figura se observa esquemáticamente la disposición de los electrodos, en donde la corriente se inyecta a través de los electrodos exteriores C_1 y C_2 y el potencial se mide a través de los electrodos interiores P_1 y P_2 , fin de obtener los valores de resistividad aparente asociado a una profundidad "a".

Si la distancia enterrada (b) es pequeña comparada con la distancia de separación entre electrodos (a). O sea, $a > 20b$, la siguiente fórmula simplificada se puede aplicar:

$$\rho_a = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad (15)$$

Donde:

ρ_a es la resistividad aparente del suelo en $\Omega \cdot m$

a es la distancia entre los electrodos adyacentes en m

R es la resistencia medida en Ω

La resistividad obtenida como resultado de las ecuaciones representa la resistividad promedio de un hemisferio de terreno de un radio igual a la separación de los electrodos.

Se recomienda que se tomen lecturas en diferentes lugares y a 90 grados unas de otras para que no sean afectadas por estructuras metálicas subterráneas y que con ellas se obtenga el promedio.

3.16 Método de solución al problema de alta resistividad de suelo

Mediante una charla técnica realizada con un profesional de ingeniería de AES en redes de tierra, se tiene el siguiente listado de posibles soluciones:

- ✓ Ampliar la malla si el terreno lo permite.
- ✓ Reducir la separación entre conductores de la malla.
- ✓ Aplicar aditivos a la malla.
- ✓ Enterramiento de barras a mayor profundidad para alcanzar capas de menor resistividad.

3.17 Normativas utilizadas para el diseño de redes de tierra

Para el diseño de redes de tierra en El Salvador se aplican las siguientes normativas:

- IEEE Std 80-2013
- IEEE Std 81-2012
- IEEE Std 142-2007
- IEEE Std 367-2012
- Acuerdo SIGET N° 29-E-2000

3.18 Software utilizado para simulación de redes de tierra

La utilización de software especializado como CYMGRD resulta fundamental para el diseño avanzado de sistemas de puesta a tierra, ya que permite obtener resultados de alta precisión. Este tipo de herramientas supera las limitaciones inherentes a los enfoques analíticos convencionales establecidos por la norma IEEE Std 80-2013, al implementar métodos numéricos como el Método de Elementos Finitos, lo que facilita el modelado y análisis de configuraciones de puesta a tierra más complejas.

Antes de realizar el diseño de una red de tierra se deben tener los estudios de cortocircuito en el lugar donde se construirá la subestación, además saber la relación X/R que son datos indispensables para realizar las simulaciones. Se utiliza las corrientes monofásica y bifásica a tierra siendo la de interés para el diseño la mayor de ellas ya que es donde se presentarán las condiciones más críticas.

Para la simulación y análisis de redes de tierra, las compañías eléctricas de El Salvador utilizan los programas CYMGRD y ETAP.

CAPÍTULO 4: SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE CASOS PRÁCTICOS, RED DE TIERRA DE SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN

4.1 Análisis paramétrico de sistemas de tierra

Un modelo de suelo bicapa puede representarse como una capa superior de espesor finito sobre una segunda capa de profundidad infinita[1]. El cambio abrupto en la resistividad, puede caracterizarse mediante un factor de reflexión. Este parámetro, denotado como K, se define por la siguiente expresión:

$$K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \quad (16)$$

En general, para un sistema de puesta a tierra en suelo uniforme o en suelo de dos capas con ρ_1 menor que ρ_2 (capa superior de resistividad del suelo menor que la resistividad del suelo de la capa inferior, con un factor de reflexión positivo), la densidad de corriente es mayor en los conductores en los bordes exteriores de la cuadrícula de tierra.

En el suelo de dos capas con ρ_1 mayor que ρ_2 (el suelo en la capa superior es más resistivo que el suelo de la capa inferior, con un factor de reflexión negativo), la densidad de corriente es más uniforme sobre todos los conductores del sistema de puesta a tierra.

(Las siguientes figuras se han tomado del anexo F de la Norma IEEE Std 80-2013 “Análisis Paramétrico de Sistemas de Tierra”).

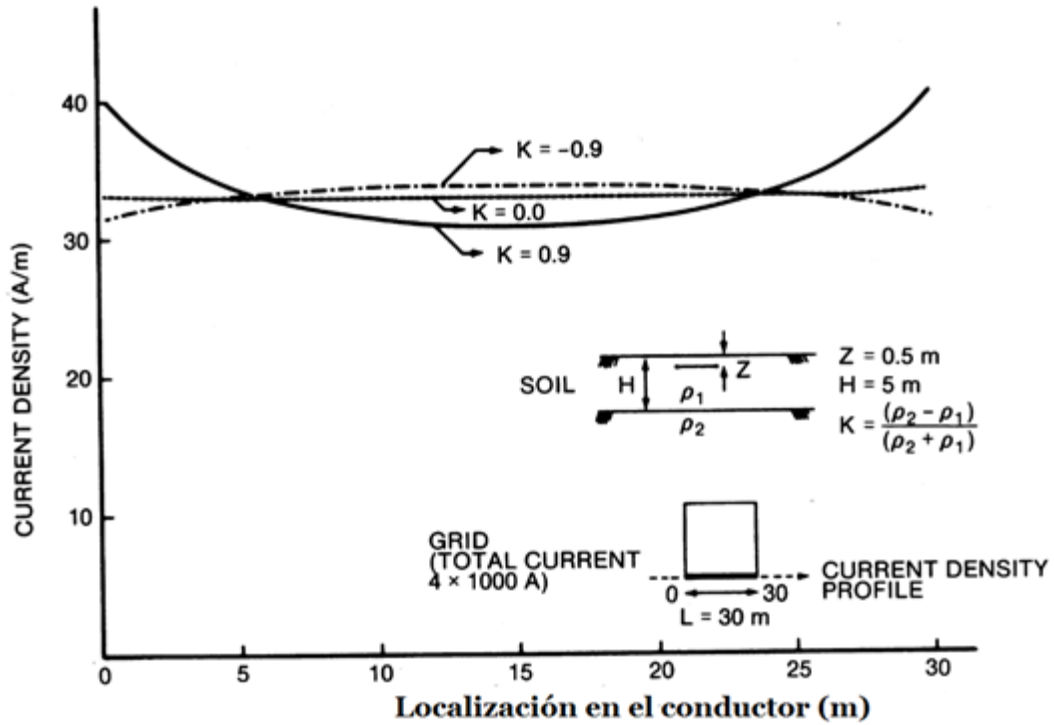


Figura 4.1. Densidad de corriente vs localización del conductor

- En la modelación del suelo uniforme la disipación de la densidad de corriente es uniforme independientemente del punto de análisis de la cuadrícula.
- Cuando se tiene un suelo más resistivo en la segunda capa con $K = 0.9$, y a medida que el suelo va incrementando la resistividad con la profundidad el efecto que se produce es que en las esquinas se va disipar mayor densidad de corriente,
- Cuando K es negativo, el comportamiento es diferente de un suelo homogéneo, se incrementa en el centro del segmento que va desde 7 m hasta 24 m aproximadamente.

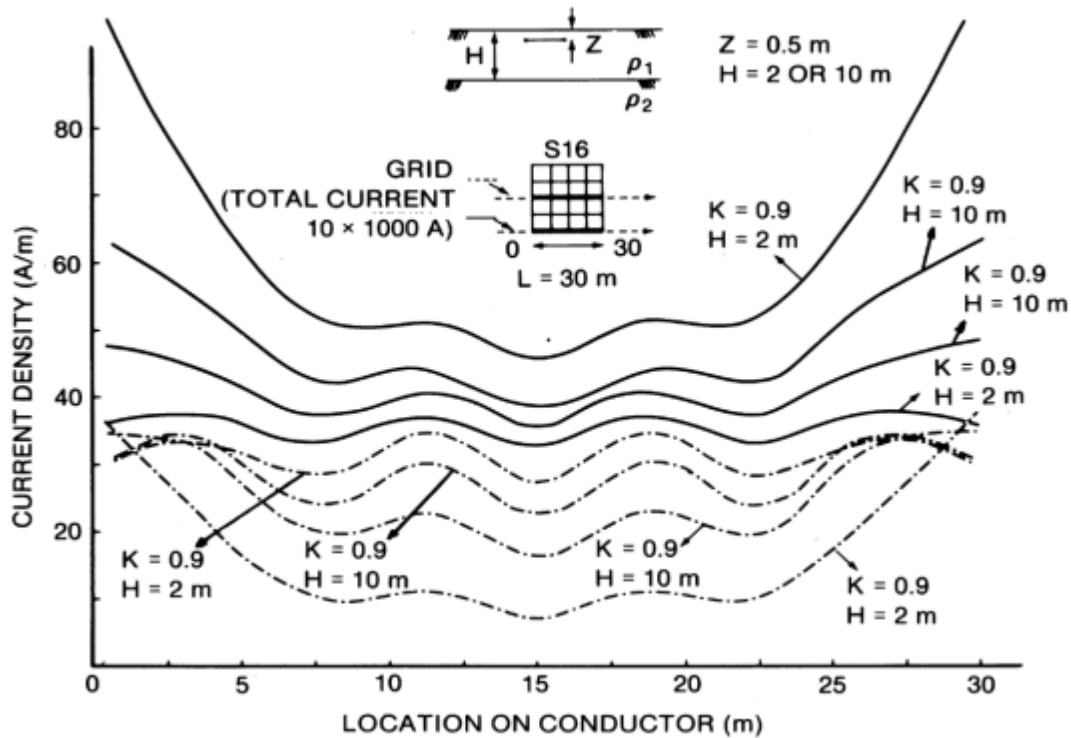
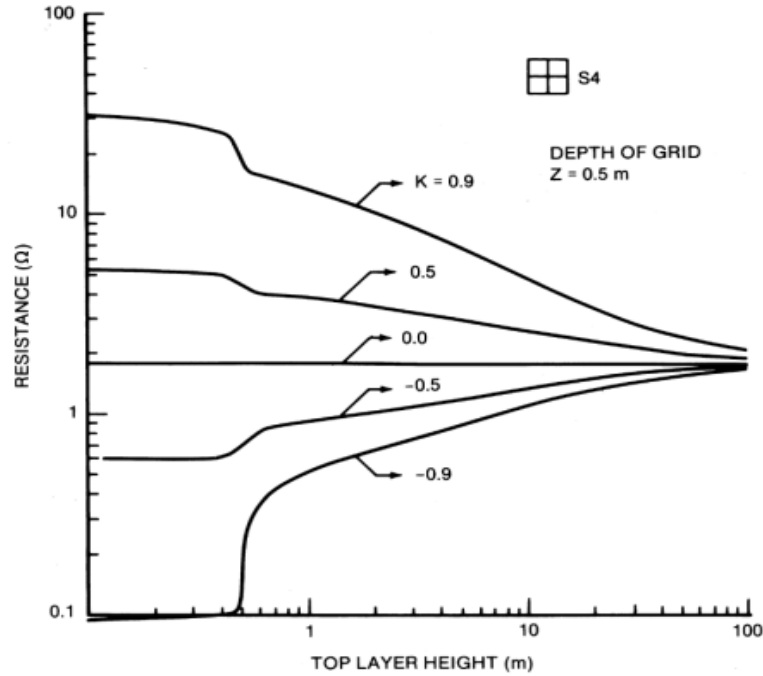


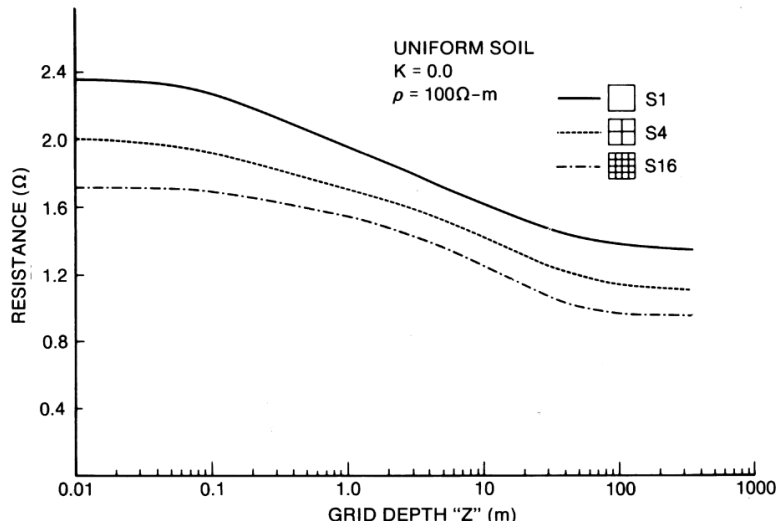
Figura 4.2. Densidad de corriente para una cuadrícula S16

En esta gráfica se plantea el análisis de dos tramos de una cuadrícula S16, en este caso la parte central y el perímetro respectivamente.

- Las gráficas de línea discontinua representan el tramo central de la cuadrícula. Se observa que para $K = 0.9$ y una altura de capa superior $H = 2$ m, la disipación de corriente de la cuadrícula es menor debido a que la distribución de corriente va aumentando desde el centro hasta los extremos de la cuadrícula. En el caso de $K = -0.9$ y $H = 10$ m, se observa que la influencia de la capa superior es mucho mayor, logrando así una mayor densidad de corriente en la cuadrícula.
- La gráfica continua está relacionada al tramo del perímetro, en el cual el comportamiento de la disipación de corriente es mucho mayor en los extremos de la cuadrícula contrario al caso anterior.



- Cuando K es positivo, es decir cuando la segunda capa es más resistiva (un suelo con un perfil de resistividad ascendente con la profundidad), y a medida que se incrementa el espesor de la primera capa, la resistividad de la tierra se reduce.
- Cuando K es negativo, es decir si la primera capa es menos resistiva, el efecto al aumentar el espesor de la primera capa es aumentar el valor de la resistencia de la cuadrícula.



- En el gráfico anterior se observan tres cuadrículas S1, S4, S16, cada una con diferente valor de resistencia a la misma profundidad debido a que la resistencia tiende a disminuir conforme aumenta el número de mallas.
- La resistencia tiende a disminuir conforme aumenta la profundidad de enterramiento de la cuadrícula.

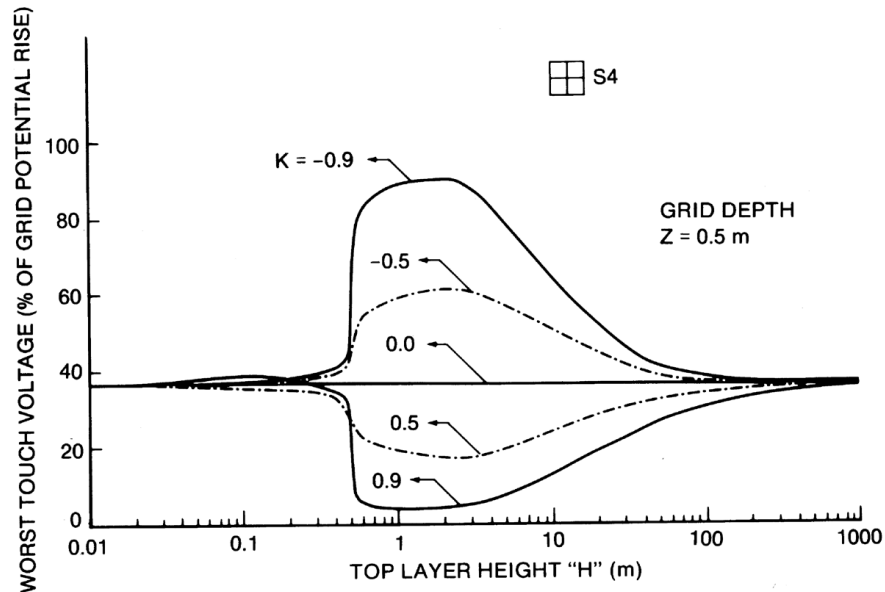


Figura 4.5. Voltajes de toque de la cuadrícula de cuatro mallas

- En el caso de $K = -0.9$ se tiene un perfil de suelo con resistividad descendente en el cual la resistividad disminuye a medida que lo hace la profundidad. En esta situación se presentan un valor mayor de potencial de toque en la cuadrícula, esto es debido a que cuando la primera capa sea más resistiva los potenciales de toque van a ser más altos.
- Para $K = 0.9$ se tiene el menor valor de potencial de toque en la cuadrícula debido a que se encuentra en la capa superior de menor resistividad, lo cual ayuda a controlar de mejor manera los potenciales de toque.
- Se observa que a medida va aumentando la altura de la primera capa el comportamiento de la cuadrícula ya sea con K positivo o negativo, tiende a ser igual al de un suelo homogéneo.

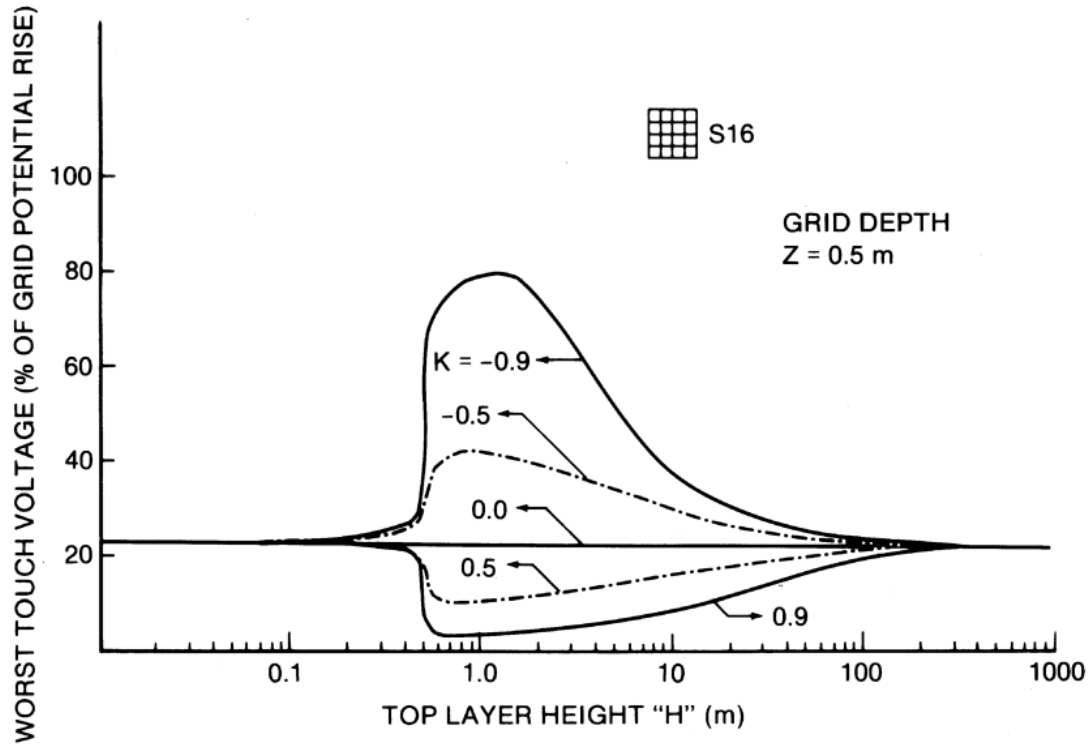


Figura 4.6. Voltaje de toque de una cuadrícula de 16 mallas

- Se tiene que para una cuadrícula de 16 mallas el voltaje de toque tiende a disminuir en relación con el caso anterior debido a que se tiene un mayor número de mallas.
- Para $K = -0.9$ el voltaje de toque tiene un mayor valor debido a que la malla se encuentra en la cuadrícula de mayor resistividad donde su influencia tiende a ser mayor.
- Para $K = 0.9$ se presenta un menor valor de voltaje de toque debido a que la capa superior del suelo tiene una resistividad menor.
- Sucede de la misma manera para los casos de $K = 0.5$ y $K = -0.5$.

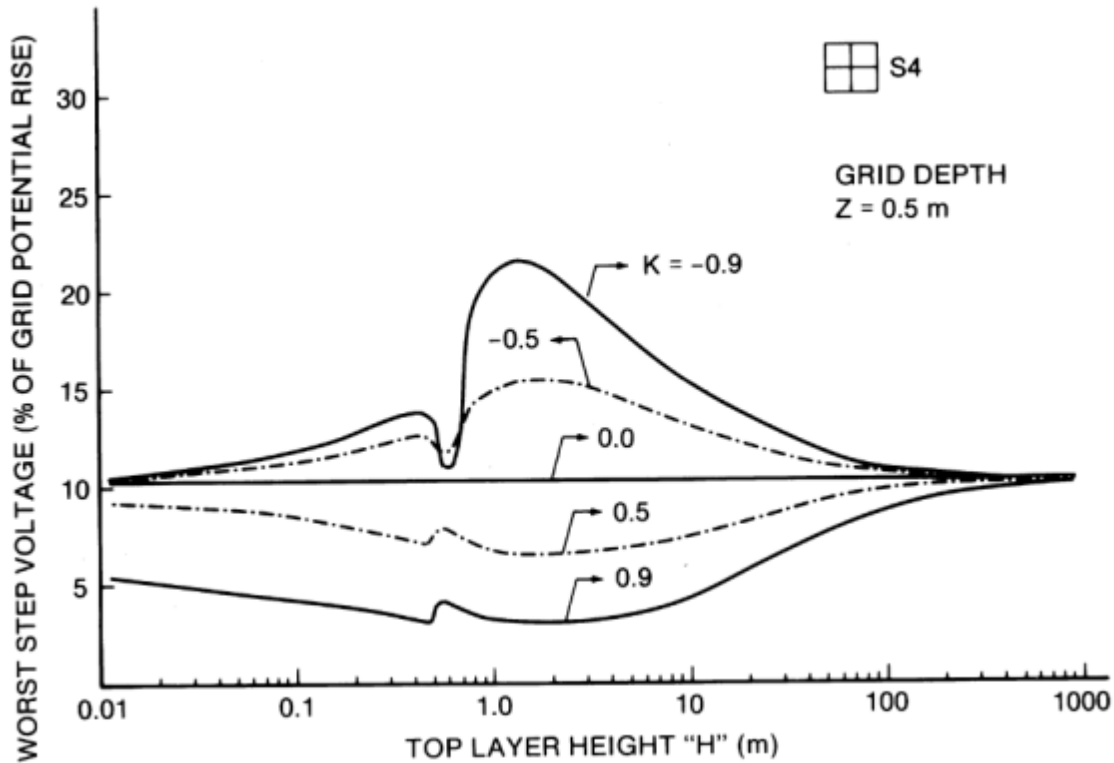


Figura 4.7. Voltajes de paso de una cuadrícula de cuatro mallas

- El mayor voltaje de toque se presenta en $K = -0.9$ debido a que la cuadrícula está en la capa superior con mayor resistividad, la cual ejerce una mayor influencia que la capa inferior.
- Para $K = 0.9$ el voltaje de paso es mucho menor debido a que en este caso la capa superior donde se encuentra la cuadrícula es menos resistiva, lo que resulta en menores magnitudes de potenciales de paso.
- Cuando la capa superior presente un valor de resistividad mayor los voltajes de paso serán mayores. Caso contrario cuando la capa superior sea menos resistiva, los voltajes de toque tienden a disminuir tal como se aprecia en la gráfica anterior.

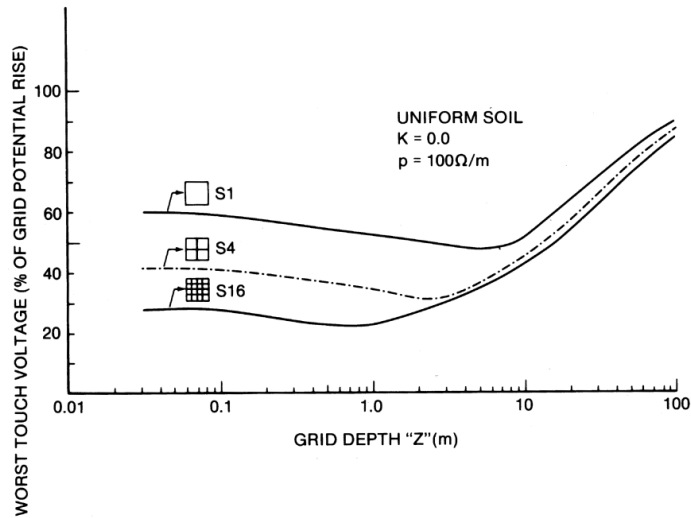


Figura 4.8. Voltaje de toque vs profundidad de enterramiento de la cuadrícula

- En este caso se ilustra el efecto de la disminución de los voltajes de toque con el aumento gradual de la profundidad, debido a que de igual manera disminuye la resistencia de tierra y el potencial de tierra.
- Si se realizan grandes aumentos en la profundidad, el voltaje de toque puede aumentar.

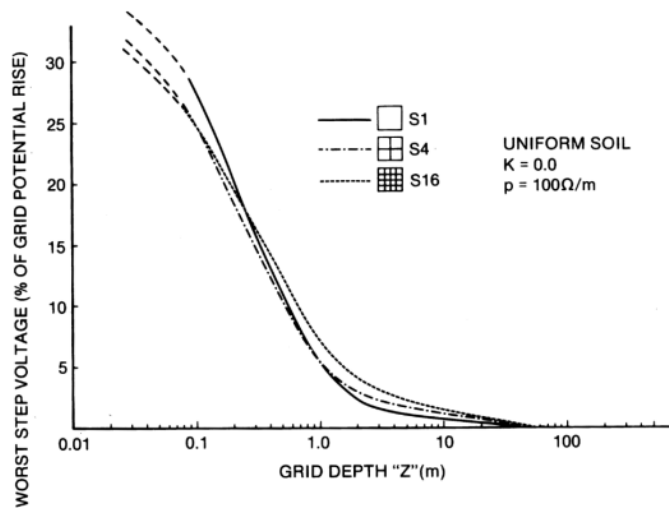


Figura 4.9. Voltajes de paso vs profundidad de enterramiento de la cuadrícula

- La gráfica anterior ilustra el efecto de la disminución de los voltajes de paso debido al aumento de la profundidad.

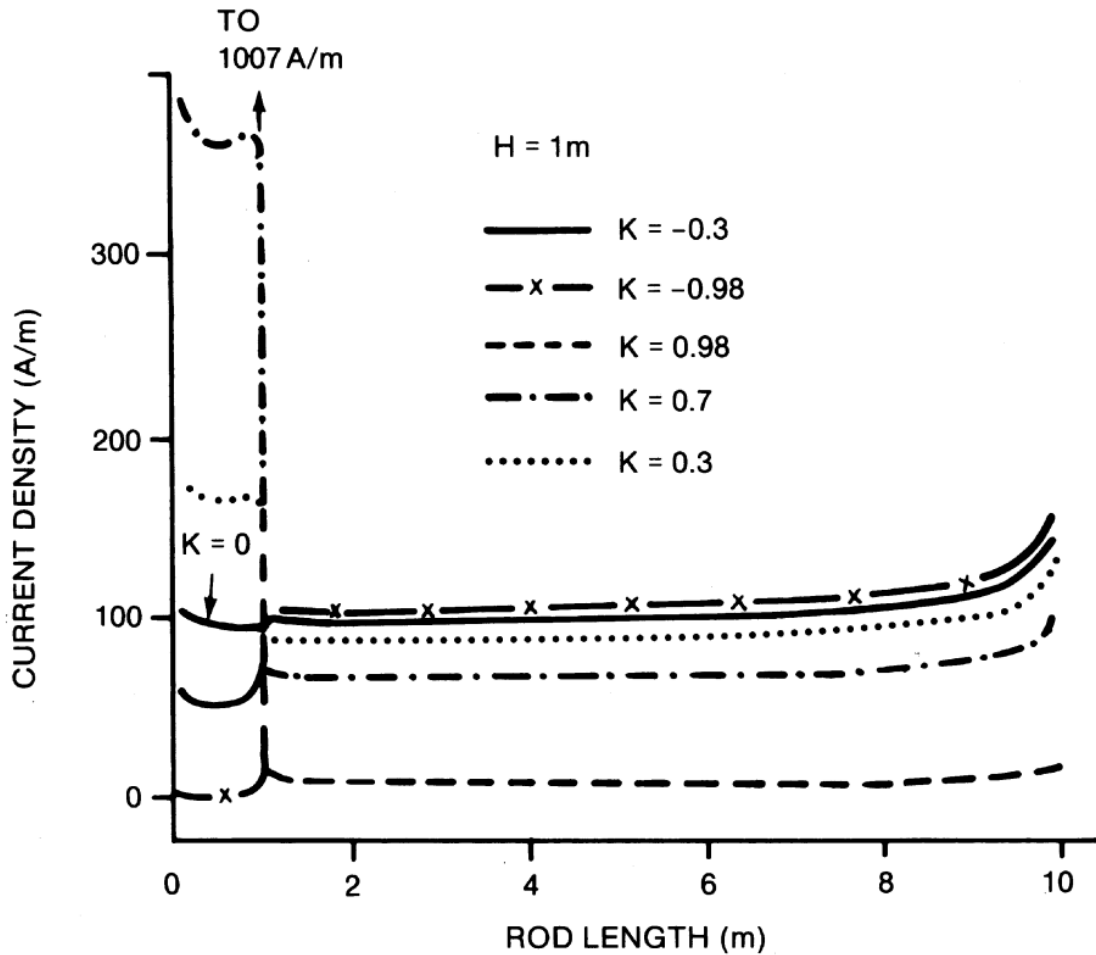


Figura 4.10. Densidad de corriente de un arreglo solo de varillas

- La densidad de corriente a lo largo de la longitud de la varilla es bastante uniforme, con un incremento mayor en los extremos de la varilla.
- Para $K = 0.7$ la densidad de corriente es mayor debido a que se encuentra en un tipo de suelo de perfil ascendente, es decir con la capa superior más resistiva con lo cual disipa mayor corriente en ella (extremo de la varilla).

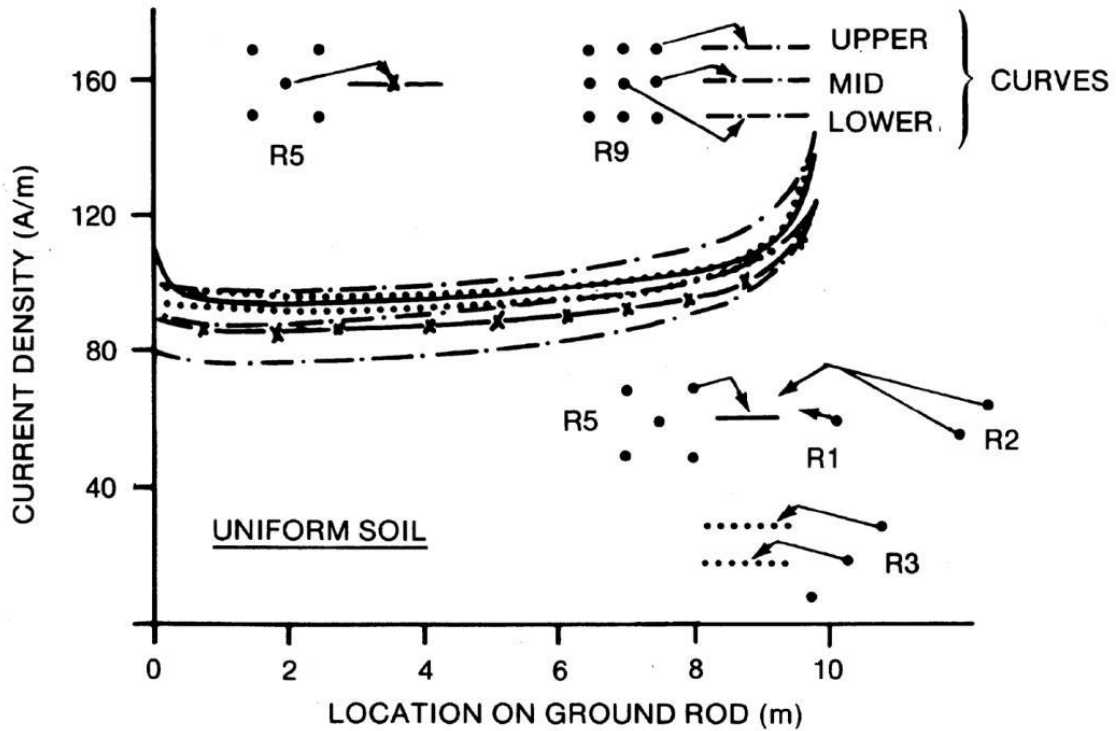


Figura 4.11. Densidad de corriente en múltiples varillas enterradas dentro de suelo uniforme

- Hay 5 configuraciones de arreglos de varillas, R1, R2, R3, R5 y R9, en las cuales se analiza el comportamiento de las diferentes densidades de corriente según su posición.
- Al igual que en el caso de la cuadrícula formada solo por conductor, la mayor densidad de corriente en las varillas es mucho mayor en los extremos como se ilustra en el caso de las gráficas, la cual presenta una densidad de corriente en la varilla del extremo que en la del centro.

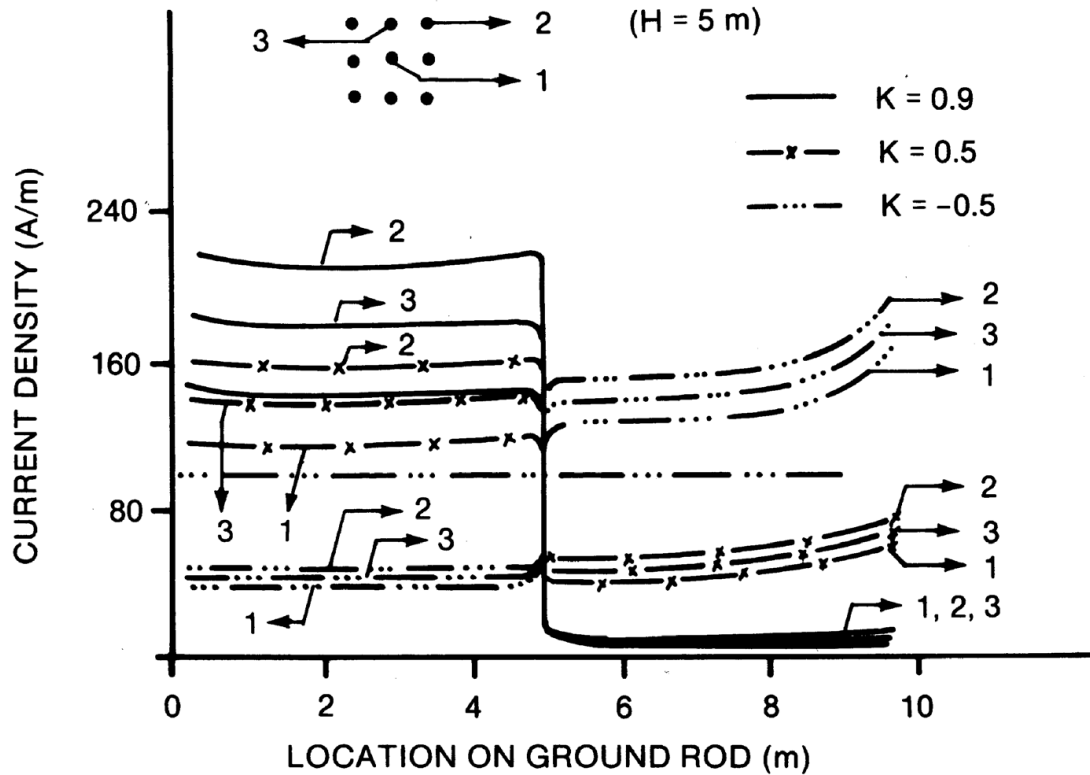


Figura 4.12. Densidad de corriente de múltiples varillas de tierra en suelo de dos capas

- Se tiene un arreglo de 9 varillas con un espesor de capa superior de $H = 5\text{ m}$, con un suelo que cuenta con distintos valores de reflexión K , es decir suelo con perfil ascendente y descendente.
- Para $K = 0.9$ en la posición 2, la disipación de corriente en el extremo superior de varilla es mucho mayor, ya que se encuentra en la capa superior que es menos resistiva.
- Para $K = 0.5$ en la posición 2 la disipación de corriente es menor ya que la diferencia entre las resistividades es menor, en la cual la primera capa sigue siendo un poco más resistiva, pero la disipación de corriente es menor en la primera capa.
- La densidad de corriente en la parte central de la varilla se encuentra que es bastante uniforme para un suelo con $K = 0.9$.

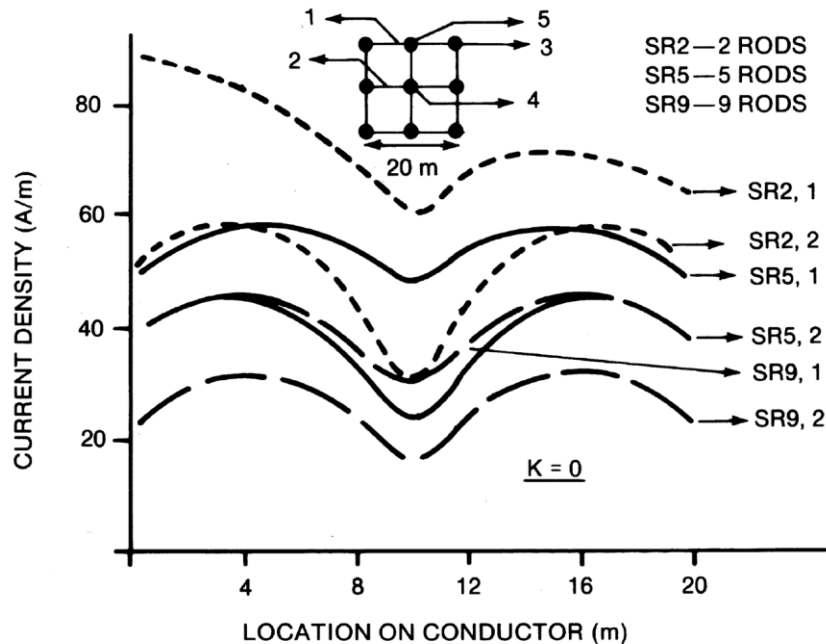


Figura 4.13. Densidad de corriente en la cuadrícula - cuadrícula y varillas en suelo uniforme

- Se presenta una cuadrícula S4 compuesta de distintas cantidades de varillas y su efecto en la disipación de densidad de corriente.
- La grafica SR2, 1, representa la combinación de cuadrícula con 2 varillas, en la cual se aprecia que la disipación de corriente es mayor debido a que se encuentra en el tramo del perímetro.
- En el arreglo SR5, 1, con 5 varillas de tierra en la misma posición presenta una tendencia de menor densidad de corriente en esa parte de la cuadrícula, debido al aumento de numero de varillas
- La configuración SR2, 2, la disipación de corriente es mucho menor con respecto a SR2, 1 debido a que se encuentra en el tramo central de la cuadrícula.
- El efecto que se tiene al aumentar el número de varillas tiene un comportamiento positivo debido a que la disipación de corriente en la cuadrícula es mucho menor al emplear este criterio.

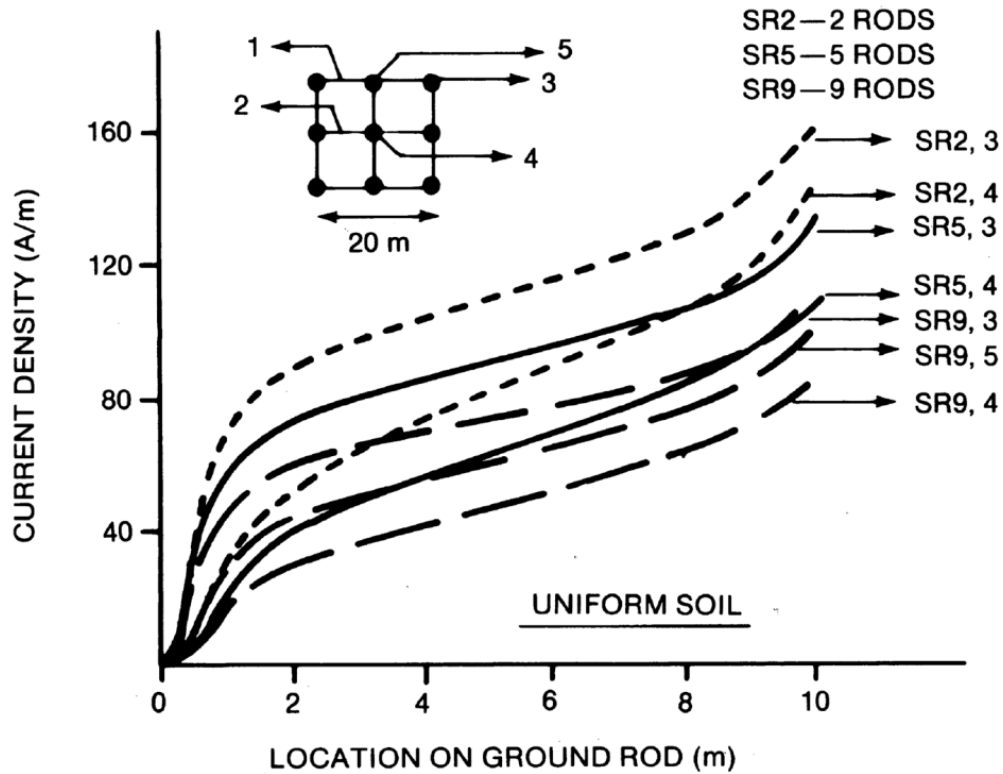


Figura 4.14. Densidad de corriente en la varilla - varillas y cuadrículas en suelo uniforme

- La densidad de corriente en SR2, 3, es mucho mayor como se muestra en la imagen ya que al igual que el conductor la mayor densidad de corriente se disipa en los extremos.
- Para SR2, 4, la densidad de corriente que disipa la varilla es menor ya que se encuentra en la parte central de la cuadrícula donde su magnitud es menor.
- Para SR5, 3, ahora la densidad de corriente es menor debido aun que se encuentre en la posición 3 como en el primer literal, pero ahora con mayor cantidad de varillas de tierra presentes.
- Para SR5, 4, de igual manera se tienen 5 varillas lo que ayuda a disminuir la disipación de corriente en ese punto de análisis.
- Para SR9, 3, aumentando la cantidad a 9 varillas, la densidad de corriente tiende a disminuir aún más como se aprecia en la imagen.

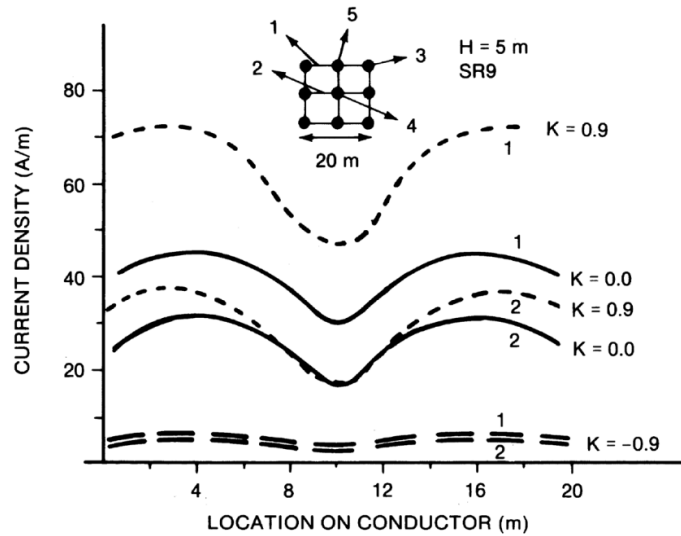


Figura 4.15. Densidad de corriente en la varilla y cuadrícula - nueve varillas y cuadrícula en suelo dos capas

- Para $K = 0.9$ en la posición de la cuadrícula 1 la disipación de corriente es mayor debido a que se trata del tramo del perímetro en el cual la densidad de corriente en general presenta una mayor intensidad.
- Para $K = 0.9$ en la posición de la cuadrícula 2 la densidad de corriente que disipa la cuadrícula es mucho menor ya que está relacionada al tramo central.
- El caso de $K = 0.0$ debido a que el tramo 1 y 2 se encuentran en el tramo central y perímetro presentan un comportamiento igual al de los casos analizados anteriormente.
- Para $K = -0.9$ respecto a las posiciones del tramo 1 y 2 presentan los menores valores de disipación de corriente en la cuadrícula. Este comportamiento es debido a que el suelo presenta un perfil de resistividad descendente, es decir que la capa inferior presenta menor resistividad donde la densidad de corriente será mayor, reduciendo así su presencia en la primera capa donde se encuentra la cuadrícula.
- La cuadrícula va a reducir la disipación de corriente en suelos donde la segunda capa tenga una resistividad menor.

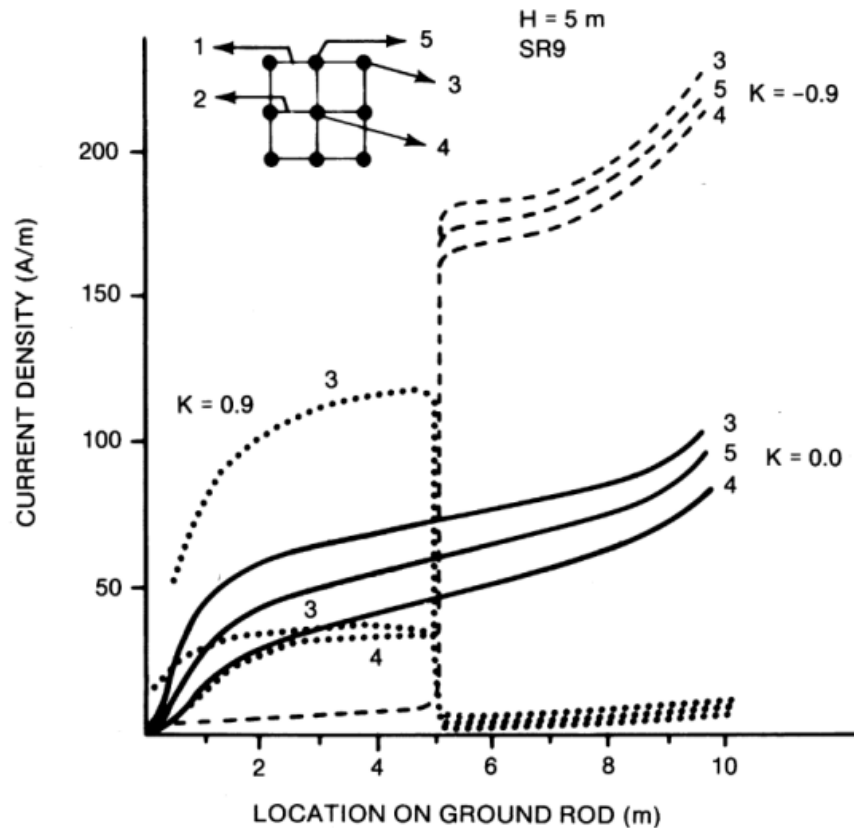


Figura 4.16. Densidad de corriente en la varilla y cuadrícula - nueve varillas y cuadrícula en suelo de dos capas

- Para $K = -0.9$ en las varillas localizadas en los puntos 3, 4 y 5 presentan los mayores valores de densidad de corriente siendo la posición 5 la mayor de ellas. Lo anterior está relacionado a que se encuentran en la capa superior del suelo donde la resistividad es mucho menor, lo cual nos indica que allí se tendrá una mayor disipación de corriente en esa localización de las varillas.
- Para $K = 0.9$ el efecto es totalmente distinto tal como se ilustra en las gráficas dado que las varillas se encuentran en la capa superior del suelo con el menor valor de resistividad en donde se tiene mayor disipación de corriente en ese tramo de la varilla.
- Para $K = 0.0$ es decir en el caso de un suelo uniforme la densidad de corriente aumentara a medida que la localización de las varillas sea mayor.

- La densidad de corriente siempre será mayor en la parte de la varilla que se encuentre en la capa de menor resistividad.

4.2 Análisis y simulación de un caso de una cuadrícula de puesta a tierra de la norma IEEE Std 80-2013 utilizando CYMGRD

En este caso se considera un modelo estratificado de suelo compuesto por dos capas, en el cual se evalúa el desempeño de la red de puesta a tierra. La configuración analizada contempla una capa superior con una resistividad de $\rho_1 = 100 \Omega \cdot m$ y una capa inferior con una resistividad de $\rho_2 = 300 \Omega \cdot m$, es decir en presencia de un perfil de resistividad de suelo ascendente con un factor de reflexión positivo.

El siguiente ejemplo muestra una cuadrícula igualmente espaciada con varillas de puesta a tierra en suelo de dos capas (Ejemplo B5 del anexo de la norma IEEE Std 80-2013)

Los datos son los siguientes:

El espesor de la capa de grava $h_s = 0.102 \text{ m}$.

La resistividad de la capa superficial $\rho_s = 2,500 \Omega \cdot m$.

$|I_0| = 3,180 \text{ A}$, y la relación $X/R = 3.33$.

Como se muestra en la figura 4.17, la cuadrícula de $60.96 \text{ m} \times 60.96 \text{ m}$ (200 pies \times 200 pies) consiste de cuatro mallas por cada lado, y tenía nueve varillas de tierra, cada una de 9.2 m (30 pies) de largo. El diámetro de las varillas de tierra es de 0.0127 m (0.5 pulgadas). El diámetro del cable de la cuadrícula es de 0.01 m , 0.5 m enterrado debajo de la superficie del suelo. La profundidad de la capa superior del suelo de $\rho_1 = 300 \Omega \cdot m$ es de 4.6 m (15 pies); el suelo inferior tiene resistividad de $\rho_2 = 100 \Omega \cdot m$.

En las siguientes figuras se muestra el diseño de la cuadrícula en el software CYMGRD y la manera de ingresar los distintos parámetros para su respectiva simulación.

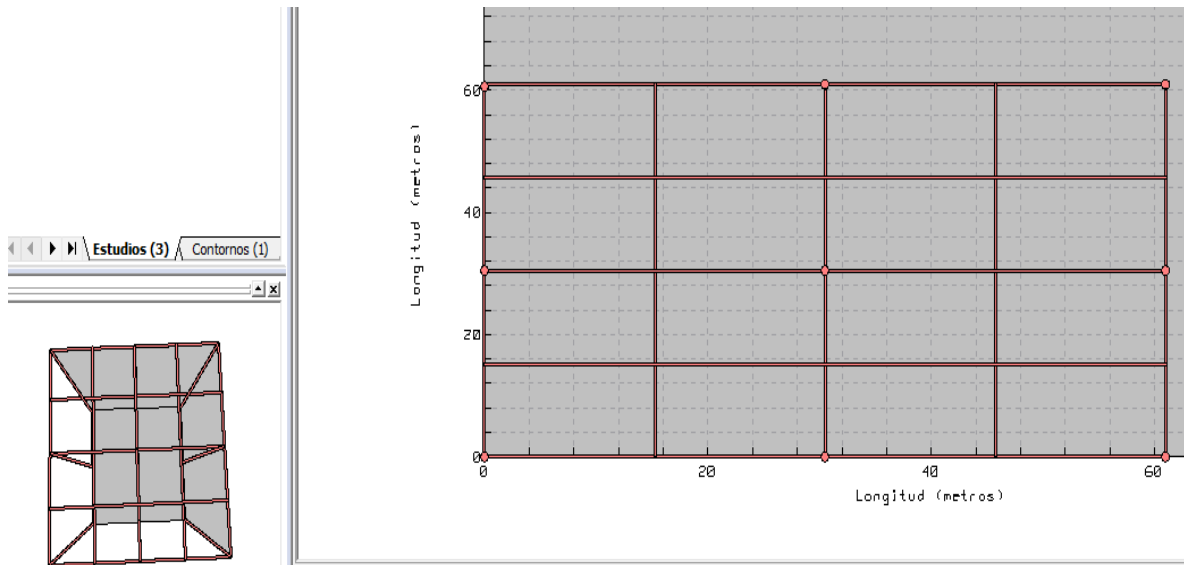


Figura 4.17. Cuadrícula igualmente espaciada con varillas de puesta a tierra en suelo de dos capas diseñada mediante CYMGRD

The figure shows two dialog boxes from the CYMGRD software. The 'Parámetros de la malla' window is open, showing the following settings:

- Nombre de la subestación: EJEMPLO5
- Instalación: Especificación 2 paralelo equivalente
- Definido por el usuario: Definido por el usuario
- Factor de corte: 0.6
- Frecuencia nominal: 60 Hz
- Corriente del electrodo de retorno: 0 amps
- Incluir la contribución local
- Electrodos:
 - Activar los conductores primarios
 - Activar los conductores de retorno
 - Activar los conductores distintos
 - Activar las varillas primarias
 - Activar las varillas de retorno
 - Activar las varillas distintas
- Resistividad del revestimiento del conductor: 10 ohmio-m
- Resistividad del revestimiento de la pica de tierra: 10 ohmio-m

The 'Parámetros del terreno' window shows the following settings:

- Título: EJEMPLO-05
- Modelo de terreno: Definido por el usuario
- Método de medición del suelo: Definido por el usuario
- Eje de medición del suelo: SM1
- Espesor de la capa superior: 4.6 metros
- Material de la capa superior: Definido por el usuario
- Resistividad de la capa superior: 100.0 ohmio-m
- Material de la capa inferior: Definido por el usuario
- Resistividad de la capa inferior: 300.0 ohmio-m
- Características del aire:
 - Temperatura ambiente: 40.0 °C
- Parámetros de seguridad:
 - IEEE-80(TM) 2013
 - Espesor de la capa superficial: 0.102 metros
 - Material de la capa superficial: Definido por el usuario
 - Resistividad de la capa superficial: 2500.0 ohmio-m
 - Duración del choque eléctrico: 0.5 seg.
 - Peso corporal: 70 kg
 - Contacto máximo permitido: 809.96 voltios
 - Paso máximo permitido: 2573.75 voltios

Figura 4.18. Configuración de parámetros de malla y suelo en CYMGRD

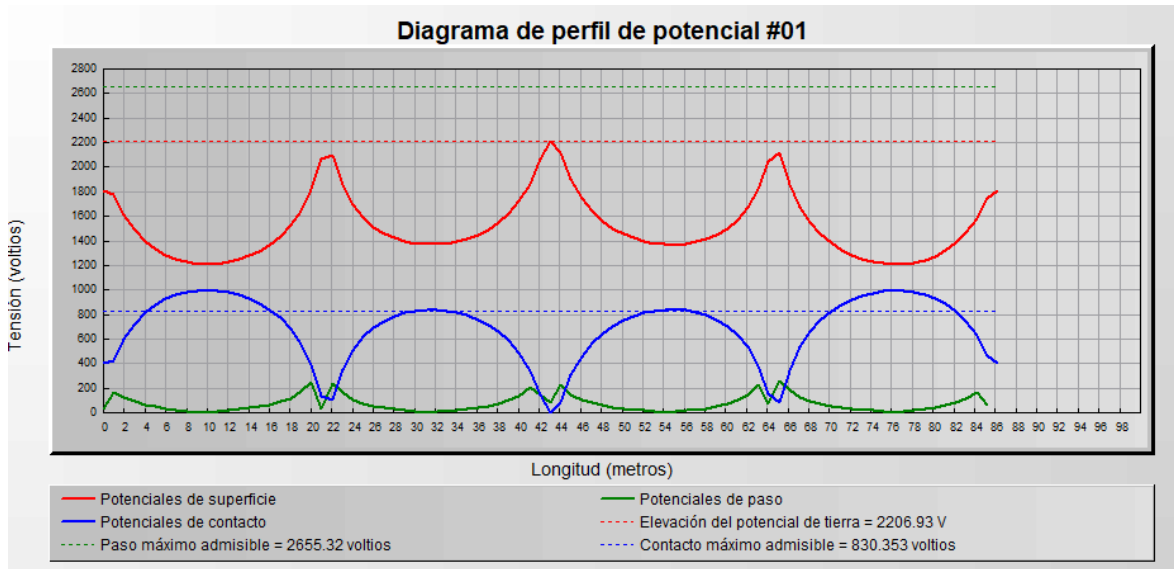


Figura 4.19. Potenciales de toque y de paso de la cuadrícula de 60.96 m x 60.96 m en CYMGRD

En la figura 4.19 se obtienen los valores máximos de los potenciales de superficie, potenciales de paso $E_{step} = 2655.32 \text{ V}$, potenciales de contacto $E_{touch} = 830.353 \text{ V}$, elevación de potencial de tierra $GPR = 2206.93 \text{ V}$. El potencial de toque presenta un valor que supera el cual supera máximo admisible tal como se muestra en la siguiente figura:

Niveles de umbral del potencial de contacto	
Elevación del potencial de tierra	2206.93 voltios
Tensión máxima admisible de paso	2655.32 voltios
Tensión máxima admisible de contacto	830.353 voltios
Máximo	
Potenciales de superficie	2206.93 voltios
Potenciales de paso	259.21 voltios
Potenciales de contacto	998.023 voltios
La tensión de paso máxima es inferior al límite tolerable	

Figura 4.20. Valores de voltaje de toque y de paso en CYMGRD

El potencial de paso registrado se encuentra significativamente por debajo del umbral permitido, como se evidencia en la figura anterior. Esta condición se explica por la relación directa entre el voltaje de paso, la resistencia de puesta a tierra y la magnitud de la corriente de falla simétrica que se disipa a través del sistema de puesta a tierra. Adicionalmente, al considerar un factor de K negativo indicativo de un perfil de resistividad del suelo decreciente con la profundidad, se favorece la conducción de

corriente hacia las capas del subsuelo con menor resistividad, lo que contribuye a una mayor eficiencia en la disipación de corriente de falla y, por ende, a una reducción del potencial de paso.

La elevación del potencial de tierra de esta cuadrícula presenta un valor de GPR = 2206.93 V supera el potencial de contacto máximo admisible. Además, el voltaje de toque supera los límites tolerables tal como se aprecia en la figura 4.19 en la curva continua de color azul, en donde se tiene un valor aproximado de 1000 V en las longitudes de 10 m y 75 m aproximadamente, los cuales superan los 830.353 V de contacto máximo admisible. Estos resultados indican que el sistema de puesta a tierra es inseguro y debe mejorarse usando las técnicas y recomendaciones de la norma IEEE Std 80-2013.

4.2.1 Análisis del diagrama de contorno

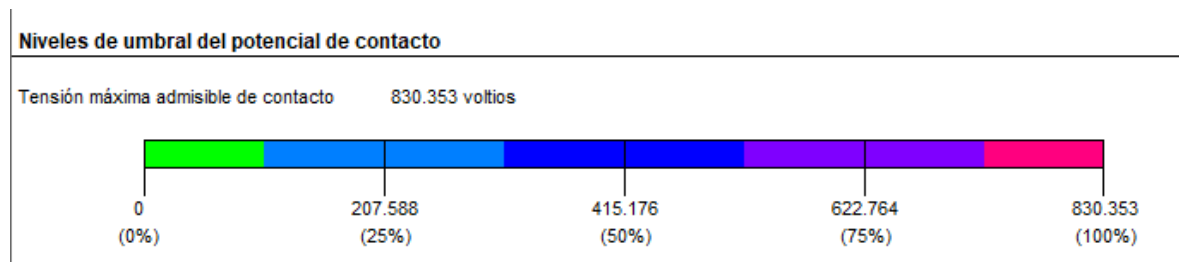


Figura 4.21. Análisis del diagrama de contorno en CYMGRD

La figura anterior muestra niveles de umbral, los cuales están divididos por colores, donde se puede apreciar que el umbral mínimo está representado por el color verde, los colores azul y morado son rangos admisibles, mientras el voltaje máximo está representado por el color rosado (es decir la condición más peligrosa).

4.2.2 Perfil de contorno

Como se puede observar los colores predominantes en este diseño son el azul y el rosado, los cuales están en el rango de umbral más peligroso, confirmando un diseño inseguro.

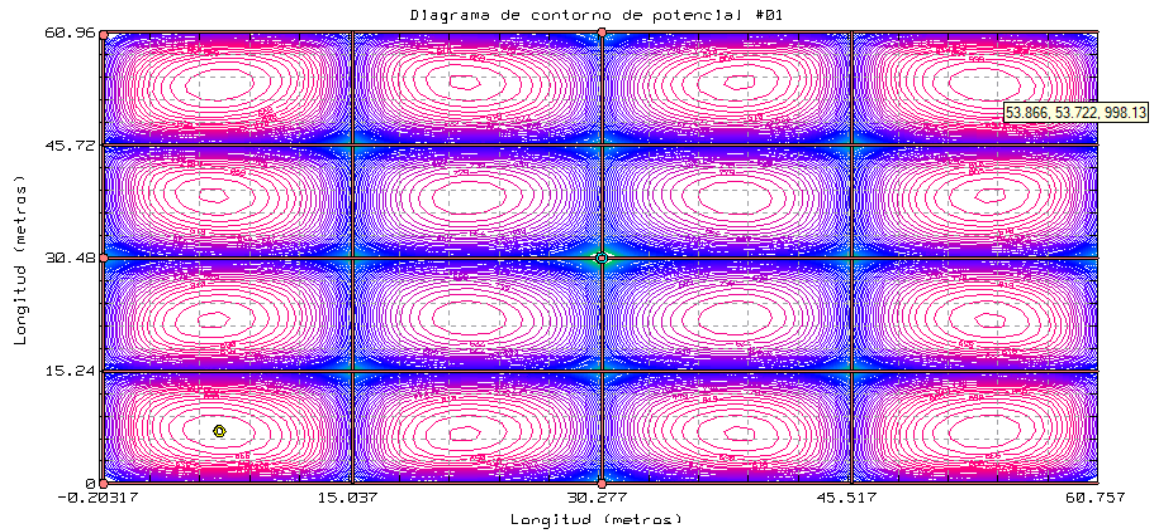


Figura 4.22. Voltaje de la malla en la esquina de la cuadrícula en CYMGRD

Para cuadrículas igualmente espaciadas el voltaje de toque se incrementa desde el centro hasta la esquina de la cuadrícula, tal como se muestra en el ejemplo.

El voltaje de la malla en la esquina es 998.13 V.

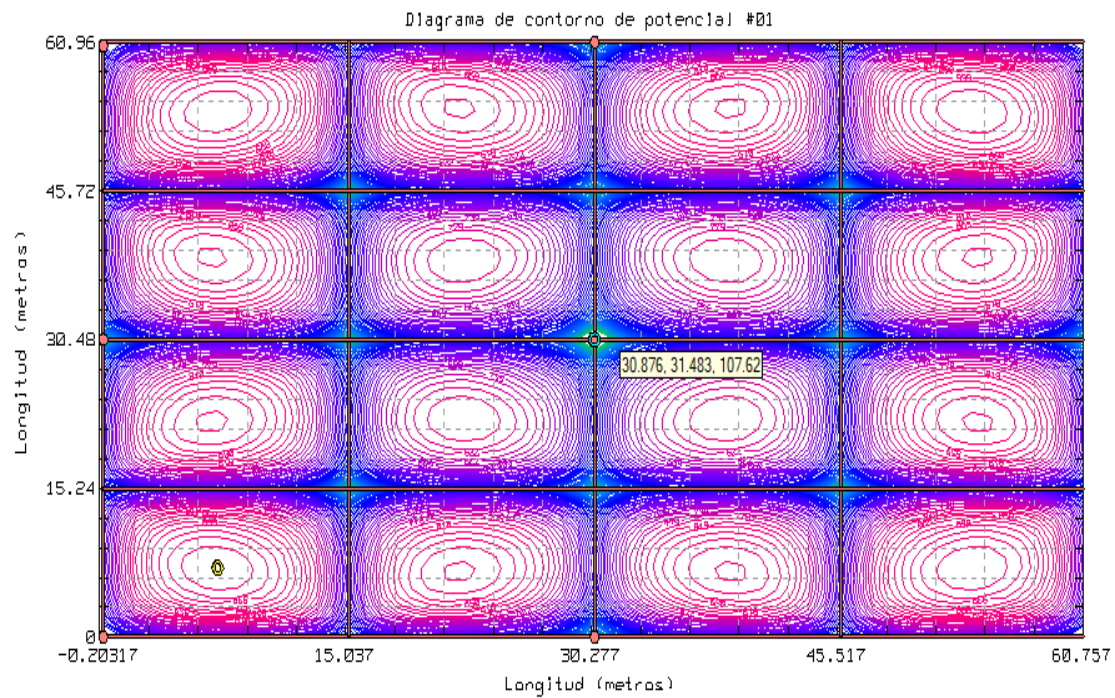


Figura 4.23. Voltaje de la malla del centro de la cuadrícula en CYMGRD

Corriente de falla a tierra						Duración de la falla (segundos)		
Frecuencia nominal	Peso corporal	Temperatura ambiente	Corriente de falla total	LG X/R	Factor de corte	Factor de decremento	Tf para Duración de la falla	Ts para Duración del choque eléctrico
60 hz	70 kg	40 °C	3180 amps	100	0.8	1.00879	0.5 secs	0.5 secs

Reporte de análisis de la malla

Resultados de salida

Z paralelo	1.71988 ohmios	Elevación del potencial de tierra	2208.93 voltios
Factor de decremento	1.00879	Resistencia de tierra calculada	1.14659 ohmios
		Resistencia equivalente	0.687954 ohmios

Figura 4.24. Valores de resistencia de tierra y GPR en CYMGRD

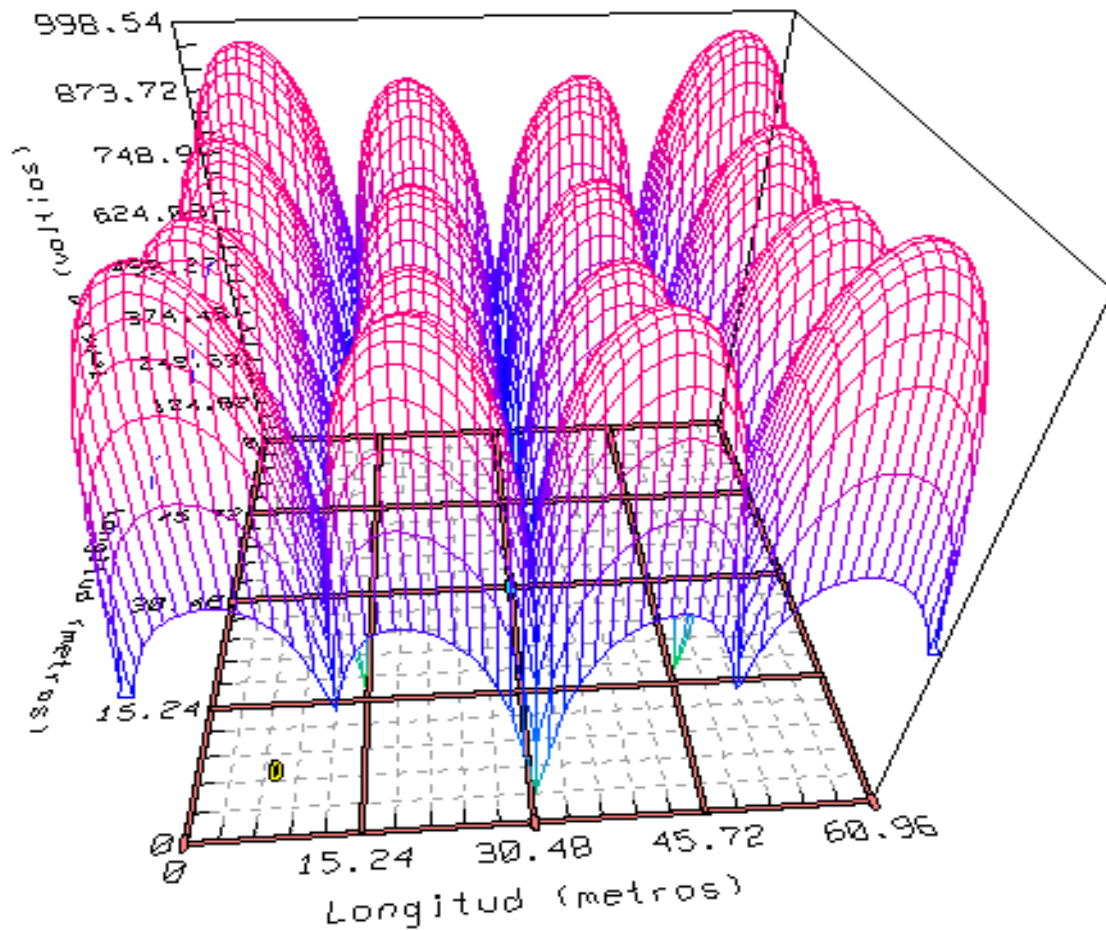


Figura 4.25. Gráfica en 3D de la cuadrícula en suelo de dos capas en CYMGRD

El gráfico ilustra las condiciones de máximos voltajes en las mallas de las esquinas, debido a que se tiene una cuadrícula con igual espaciamento. La relación de voltaje de la malla del centro entre la malla de la esquina es:

Nº de cuadrícula	Mallas	Em/ Ecentro
1	16	9.2745

Tabla 4.1 Relación de voltajes E_m/E_{centro} con cuadrícula de 60.96 m x 60.96 m

La tabla anterior muestra que el voltaje en la esquina es casi 9.3 veces mayor que en el centro de la cuadrícula.

4.2.3 Líneas equipotenciales

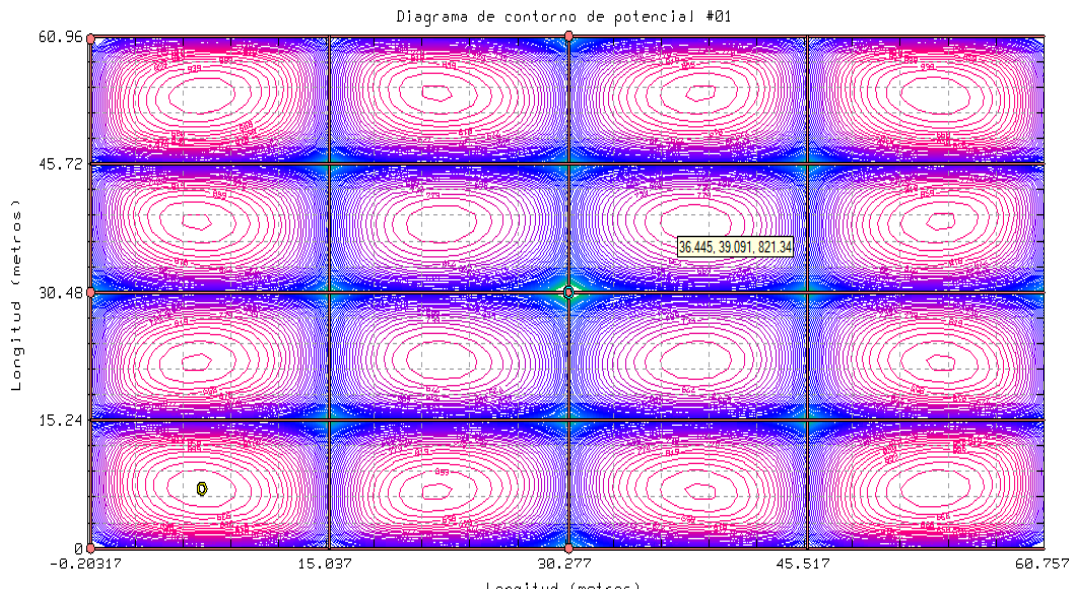


Figura 4.26. Perfil de contorno para análisis de líneas equipotenciales línea 1 en CYMGRD

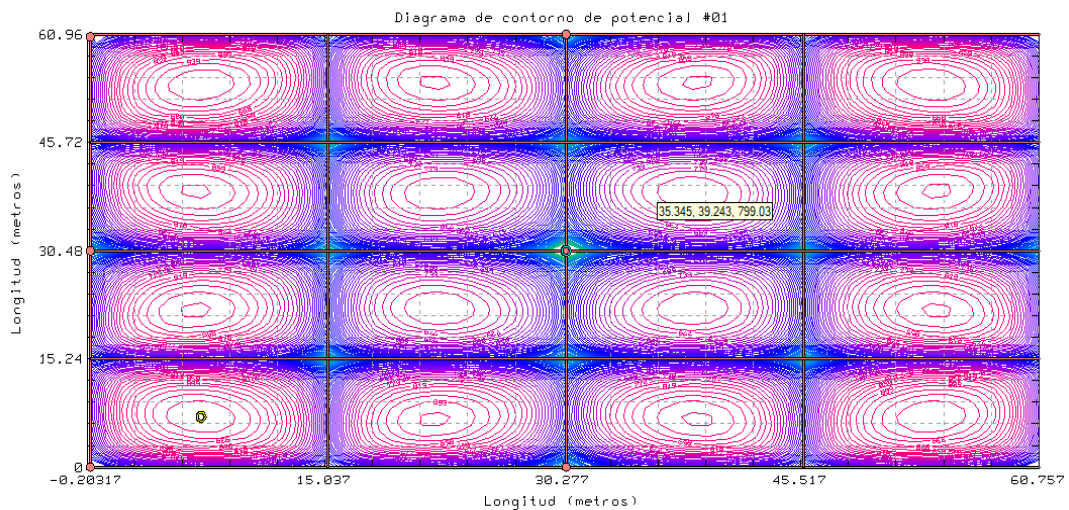


Figura 4.27. Perfil de contorno para análisis de líneas equipotenciales línea 2 en CYMGRD

Se puede ver que a una distancia de un metro de las líneas equipotenciales de la malla de la tercera columna y la fila 2 existe una diferencia de potencial mínima entre la línea del centro la malla y una línea a 1 m de distancia la cual no va a representar peligro porque está dentro del rango de seguridad.

4.3 Versión modificada de la cuadrícula en un suelo de dos capas

La solución acá presentada se hizo a través de una de las recomendaciones de la norma IEEE Std 80-2013 en este caso consiste en reducir la separación del conductor para mejorar los potenciales de toque y de paso.

Las dimensiones de la cuadrícula original presenta un valor de 15.24 m de separación, mientras que la cuadrícula modificada tiene un valor de 7.62 m.

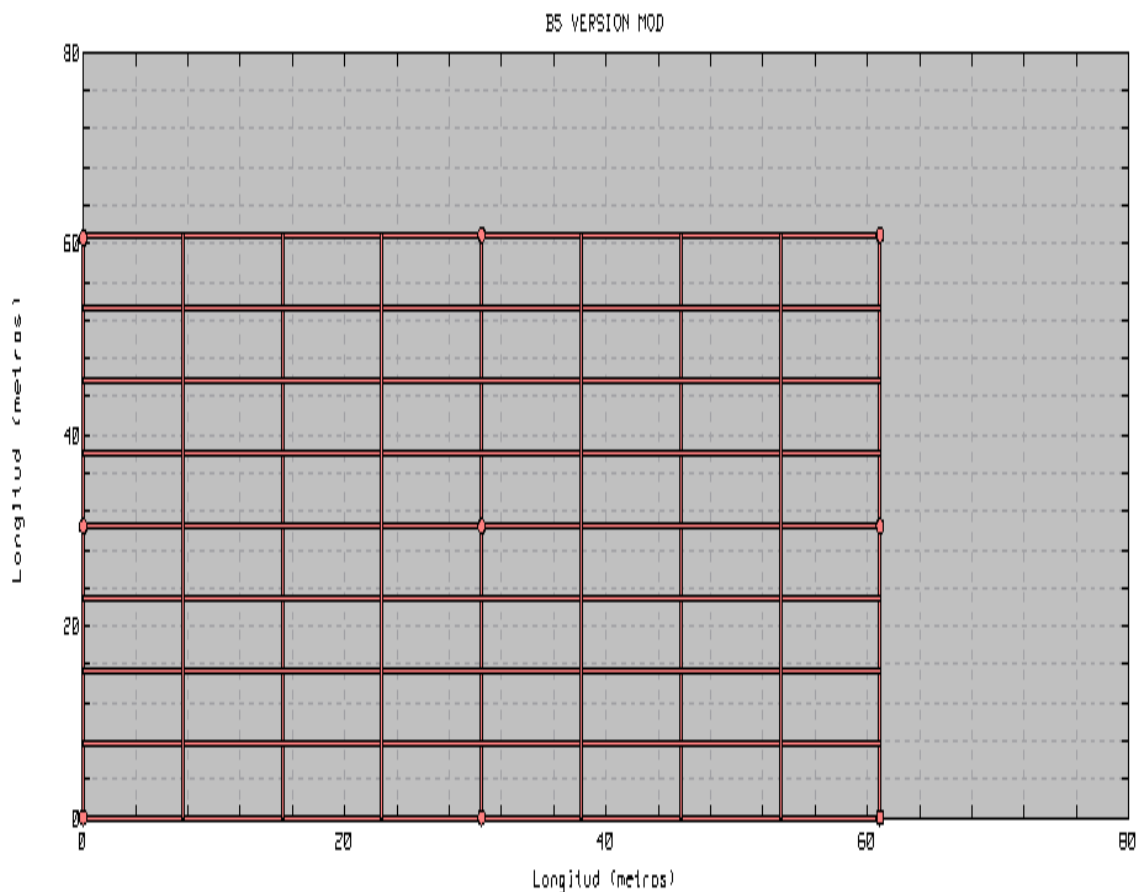


Figura 4.28. Cuadrícula igualmente de 60.96 m x 60.96 m espaciada con varillas de tierra en suelo de dos capas diseñada con menor separación del conductor en CYMGRD

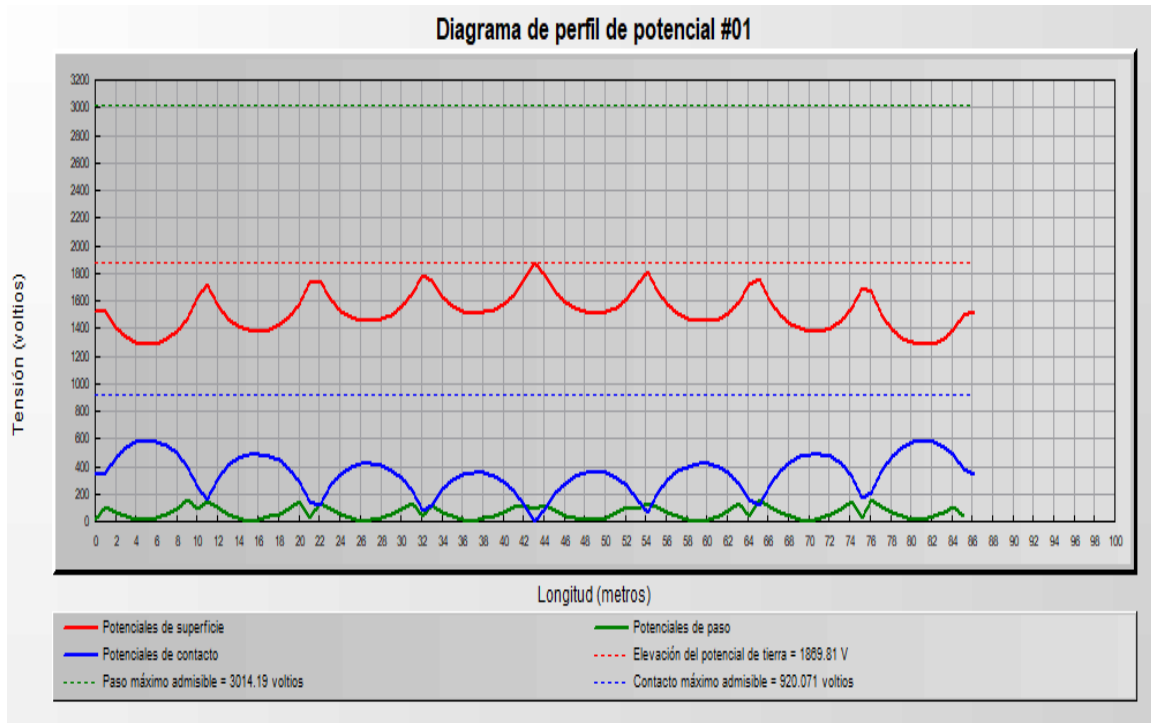


Figura 4.29. Potenciales de toque y de paso de la cuadrícula de 60.96 m x 60.96 m con una menor separación del conductor en CYMGRD

En este nuevo diseño se tiene un mejor comportamiento del voltaje de toque ya que ahora presentan un valor de aproximadamente $E_{touch} = 200$ V el cual está por debajo de los límites tolerables, logrando así un diseño seguro.

4.3.1 Perfil de contorno de la cuadrícula con menor separación del conductor

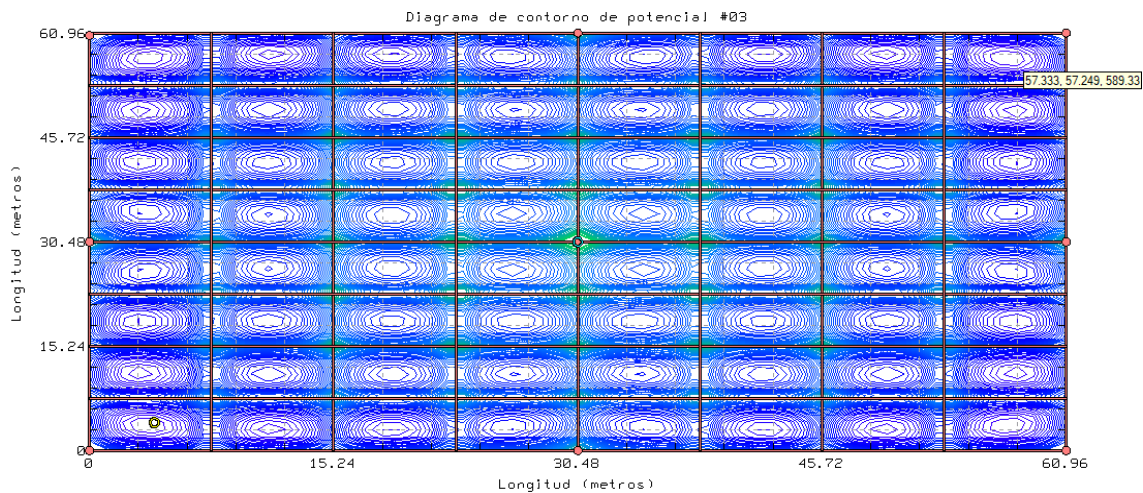


Figura 4.30. Perfil de contorno de la cuadrícula con menor separación del conductor

El nuevo nivel de umbral de contacto refleja los colores verde y azul los cuales estarían de 0 a 50 % del máximo umbral de contacto como se muestra en la figura 4.30. Este resultado muestra condiciones de voltaje de toque y de paso más seguros.

El voltaje de la malla de la esquina de la figura anterior es 589.33 V.

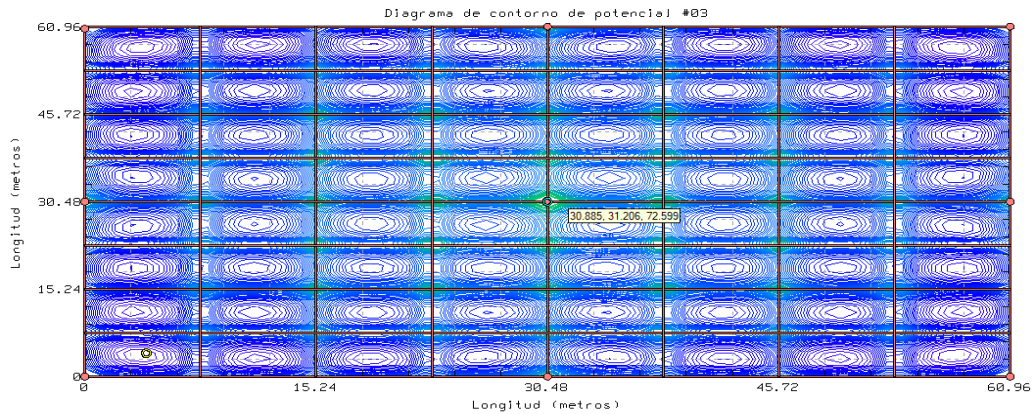


Figura 4.31. Voltaje en el centro de la cuadrícula con menor separación del conductor

El voltaje de la cuadrícula en el centro es 72.599 V. Por tanto, la relación de voltaje de la malla del centro entre la malla de la esquina es:

Nº de cuadrícula	Mallas	Em/ Ecentro
2	16	9.2745

Tabla 4.2. Relación de voltajes E_m / E_{centro} con cuadrícula de menor separación de conductor

El voltaje en la esquina es casi 9.3 veces mayor que en el centro de la cuadrícula.

4.4 Análisis y simulación de Subestación Bululú – CLESA

En el presente caso se realiza la simulación de la subestación Bululú de CLESA, la cuadrícula cuenta con las siguientes dimensiones 15 m x 21 m, cuenta con nueve varillas de puesta a tierra con un diámetro de 20 mm y una longitud de $L = 10$ m, el diámetro del cable de la cuadrícula es 4/0.

La distribuidora realizó un estudio de resistividad de suelo, encontrando que se tiene una estructura de suelo de dos capas con valores de $\rho_1 = 109.3 \Omega \cdot m$, $\rho_2 = 1 \Omega \cdot m$.

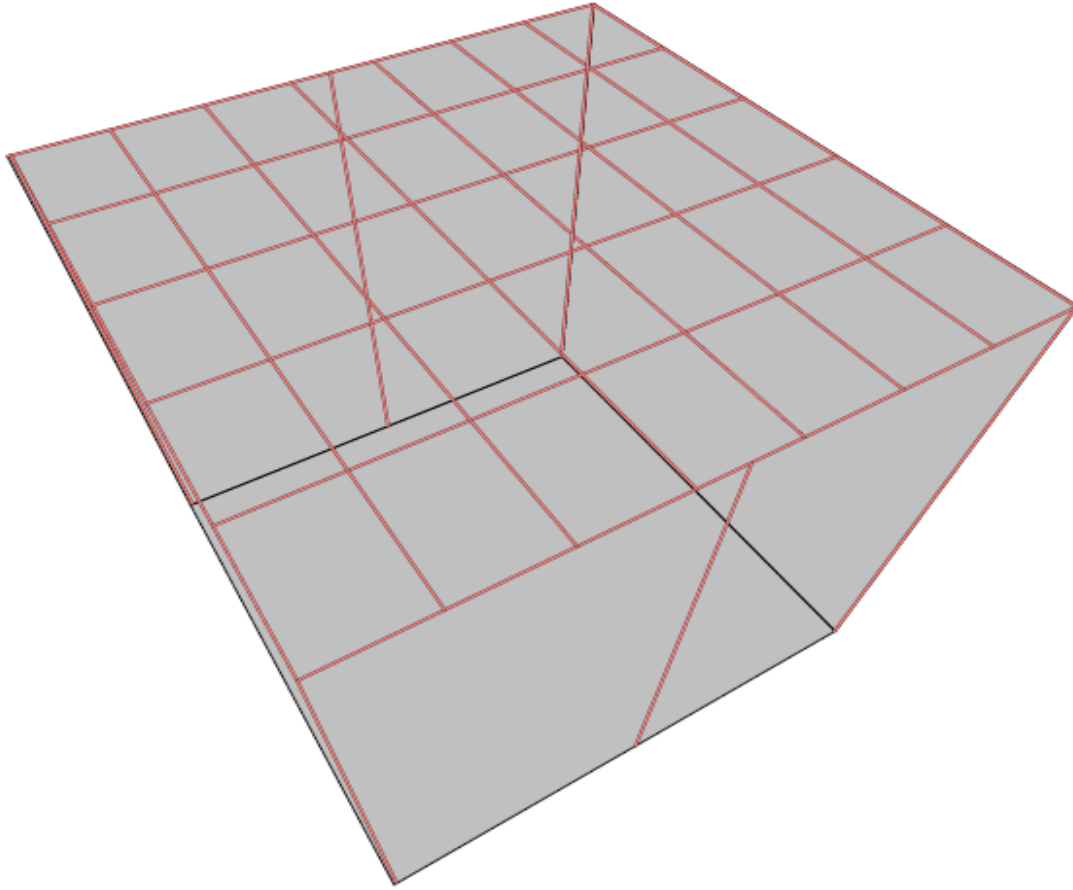


Figura 4.32. Cuadrícula de la Subestación Bululú- CLESA modelada en CYMGRD

La Subestación Bululú ubicada en Sonzacate, Sonsonate, cuenta con las siguientes características de diseño:

- $\rho_1 = 109.3 \Omega \cdot \text{m}$, $\rho_2 = 1 \Omega \cdot \text{m}$.
- $S_f = 1.0$
- Altura de la capa superior $H = 1.47 \text{ m}$.
- Resistividad de la capa superficial $\rho_s = 8,534 \Omega \cdot \text{m}$.
- Duración de tiempo de falla $t_f = 1 \text{ s}$.
- Peso corporal 50 kg.
- Corriente de falla $3I_0 = 7,049 \text{ A}$.
- Voltaje de la subestación 46 kV.
- Espesor de la capa superficial $h_s = 0.5 \text{ m}$.

Con los datos anteriores se realizó la simulación de la red de tierra de la Subestación Bululú. Los resultados se muestran a continuación:

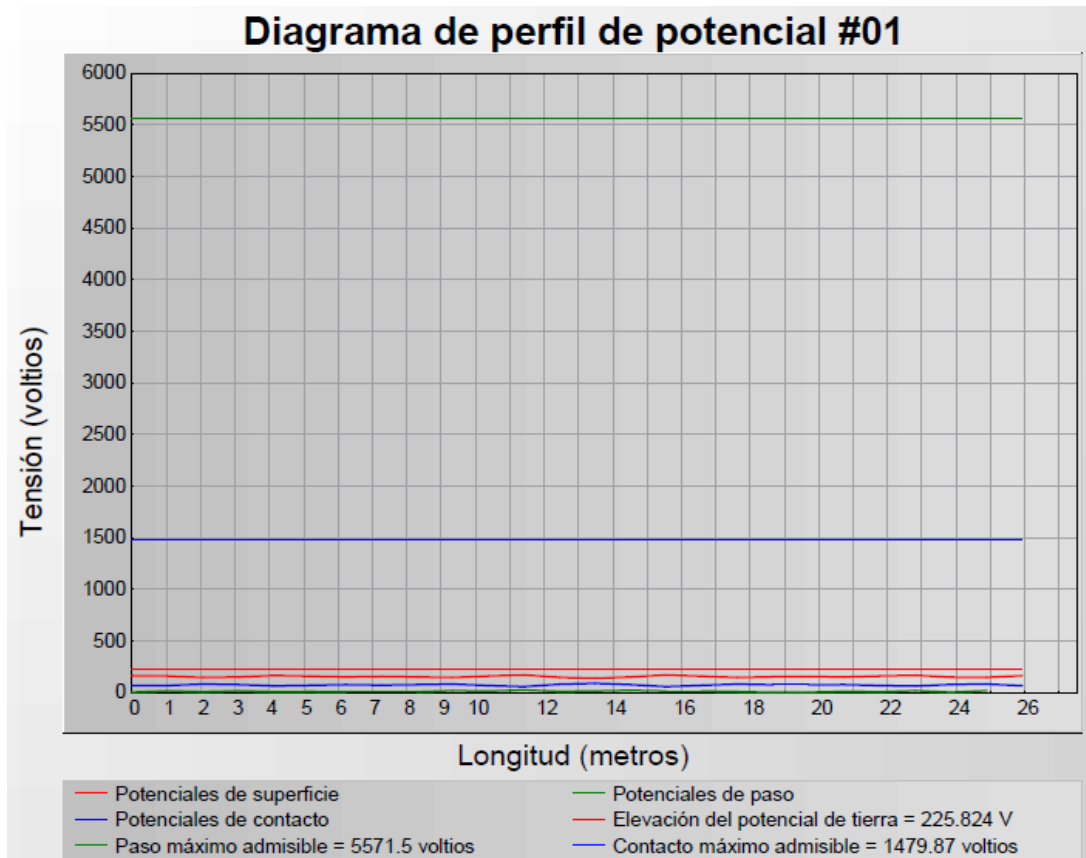


Figura 4.33. Perfil de potenciales de paso y de toque de la subestación en CYMGRD

Las curvas debajo de los 500 V representan los voltajes de toque y de paso máximos presentes en la red de tierra de la Subestación Bululú. Lo cual muestra que están por debajo de los límites tolerables como se muestra en la siguiente imagen:

Niveles de umbral del potencial de contacto	
Elevación del potencial de tierra	225.824 voltios
Tensión máxima admisible de paso	5571.5 voltios
Tensión máxima admisible de contacto	1479.87 voltios
Máximo	
Potenciales de superficie	169.84 voltios
Potenciales de paso	23.21 voltios
Potenciales de contacto	88.974 voltios

La tensión de paso máxima es inferior al límite tolerable

Figura 4.34. Valores de voltaje de paso y de toque en CYMGRD

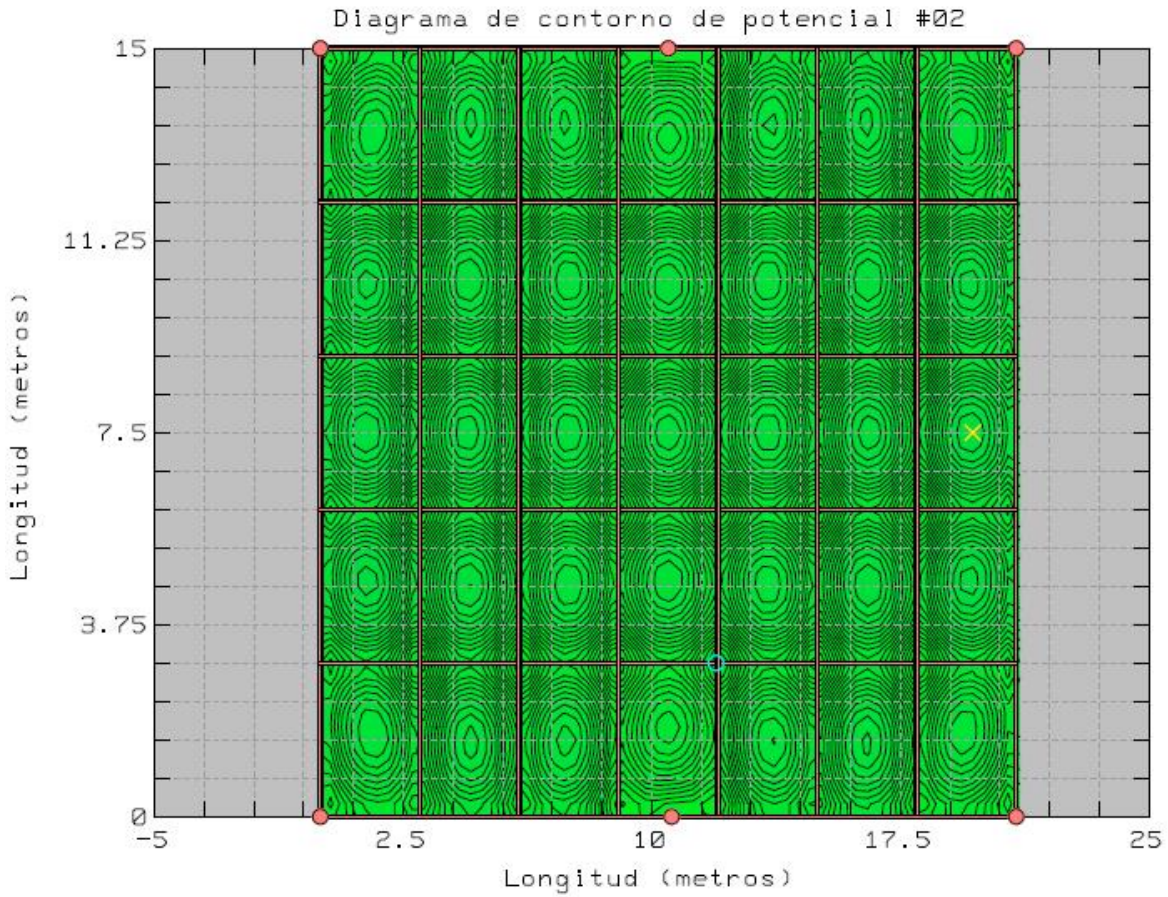


Figura 4.35. Diagrama de contorno de la cuadrícula Bululú-CLESA en CYMGRD

Niveles de umbral del potencial de contacto

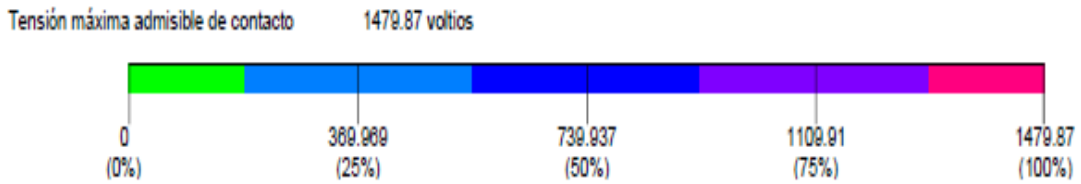


Figura 4.36. Umbral de potencial de contacto de la Subestación Bululú

El nivel de umbral de potencial de contacto tiene su representación en los diferentes colores. En este caso el porcentaje de tensión máxima de contacto se encuentra en un 12% lo cual indica que el diseño es seguro. Si la cuadrícula presentara zonas con colores rosa y púrpura se debería revisar el diseño de la red de puesta a tierra.

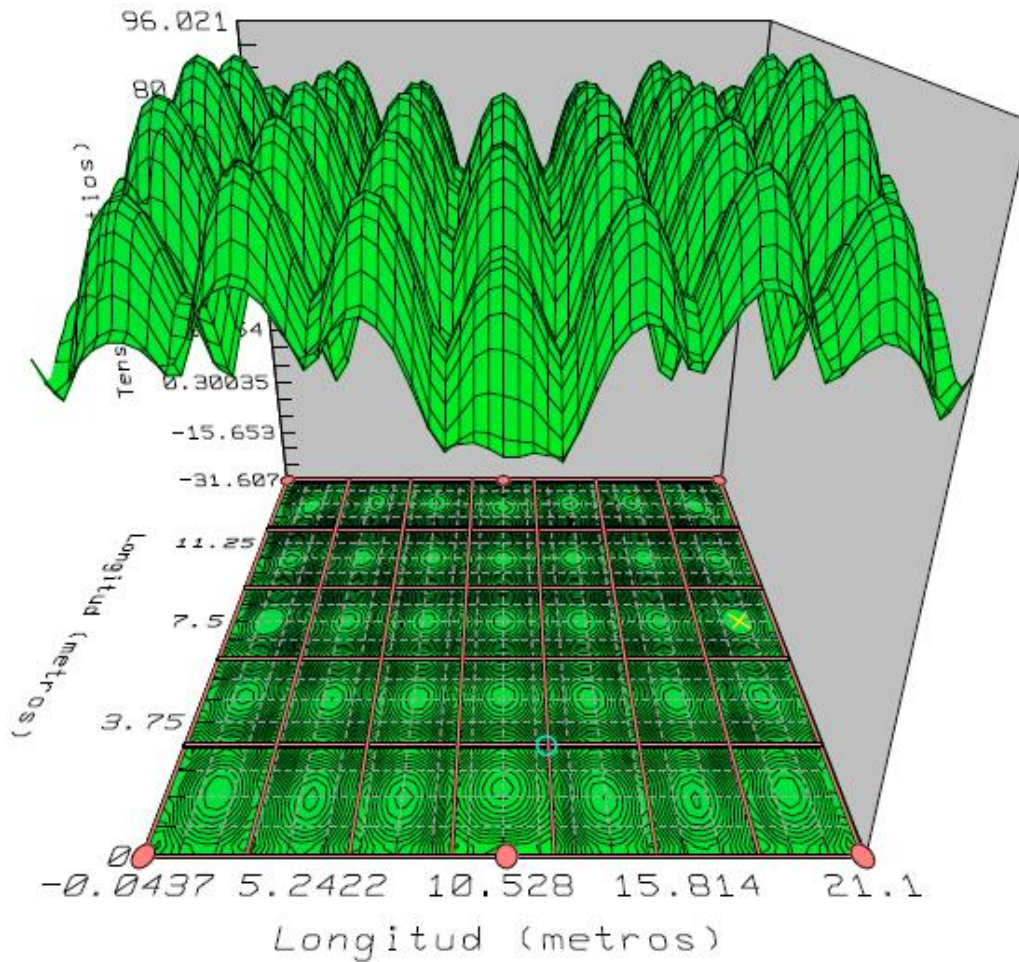


Figura 4.37. Gráfica 3D de la subestación Bululú-CLESA en CYMGRD

Tal como lo muestra la figura anterior, los voltajes son bastante uniformes dentro de la cuadrícula de puesta a tierra, con un leve aumento en las esquinas. Esto es debido a que, en las redes de tierra igualmente espaciadas, el voltaje de malla se incrementa desde el centro hasta la esquina de la cuadrícula. Debido a que los colores de la cuadrícula son verdes su diseño es excelente tal como se mencionó anteriormente.

Reporte de análisis de la malla			
Resultados de salida			
Z paralelo	28482.5 ohmios	Elevación del potencial de tierra	225.824 voltios
Factor de decremento	1.12477	Resistencia de tierra calculada	0.0284825 ohmios
		Resistencia equivalente	0.0284824 ohmios

Figura 4.38. Valores de resistencia de tierra y GPR en CYMGRD

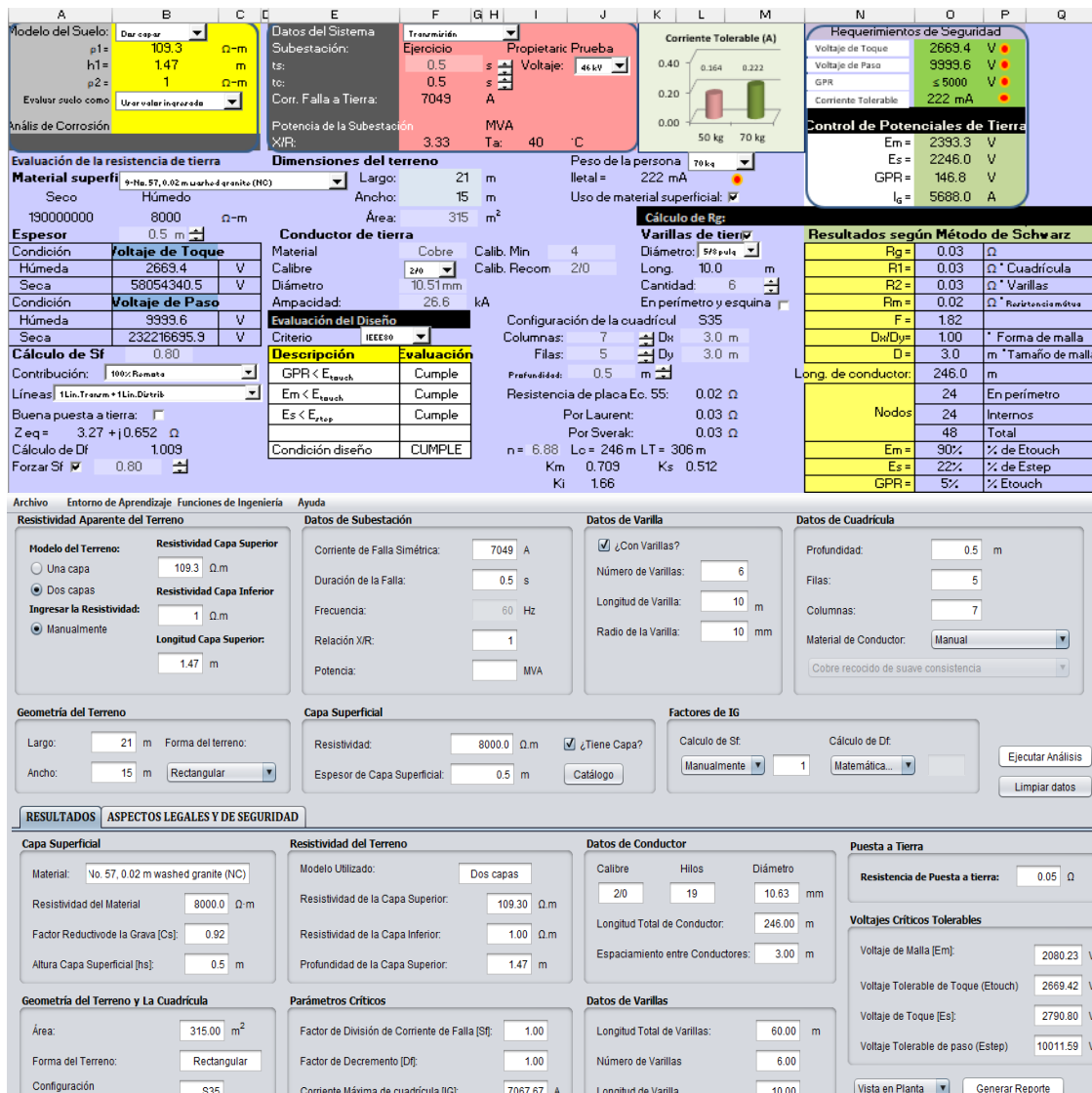


Figura 4.39. Resistencia de tierra y GPR mediante Actividad 131 y RPAT de la SE Bululú

A través del uso de las herramientas Actividad 131 y RPAT para el cálculo de la resistencia de tierra se observa que existen mínimas diferencias en los resultados obtenidos. La resistencia de tierra obtenida en la hoja de cálculo excel es de $R_g = 0.03 \Omega$, mientras que en el software RPAT se tiene $R_g = 0.05 \Omega$, con lo cual los valores de resistencia de tierra son similares al valor obtenido mediante CYMGRD.

En la subestación de distribución Bululú-CLESA la red de puesta a tierra fue instalada sobre un terreno con baja resistividad eléctrica, lo cual favorece el desempeño del sistema. La cuadrícula de puesta a tierra presenta una configuración tipo S35, compuesta por 35 mallas cuadradas a una profundidad de 0.5 m.

4.5 Caso práctico Subestación Apopa – ETESAL

Para la subestación de Apopa se realiza la simulación de la subestación en dos partes, en la cual la primera simulación se realiza en un suelo uniforme y en la segunda parte mediante el modelamiento de suelo de dos capas, con el fin de analizar el comportamiento de la red de puesta a tierra en ambos casos. La cuadrícula cuenta con un diseño irregular en el cual se tienen diferentes dimensiones de mallas, además cuenta con 32 varillas de puesta a tierra con dimensiones de 15.88 mm x 3.05 m, el diámetro del cable de la cuadrícula es 4/0.

Mediante un estudio de resistividad de suelo por parte de ETESAL, se obtuvieron los valores de resistencia de tierra bajo las condiciones mostradas en la sección 4.7.

A continuación, se muestra un diagrama de flujo del proceso que se siguió para la simulación de este caso en el software CYMGRD:

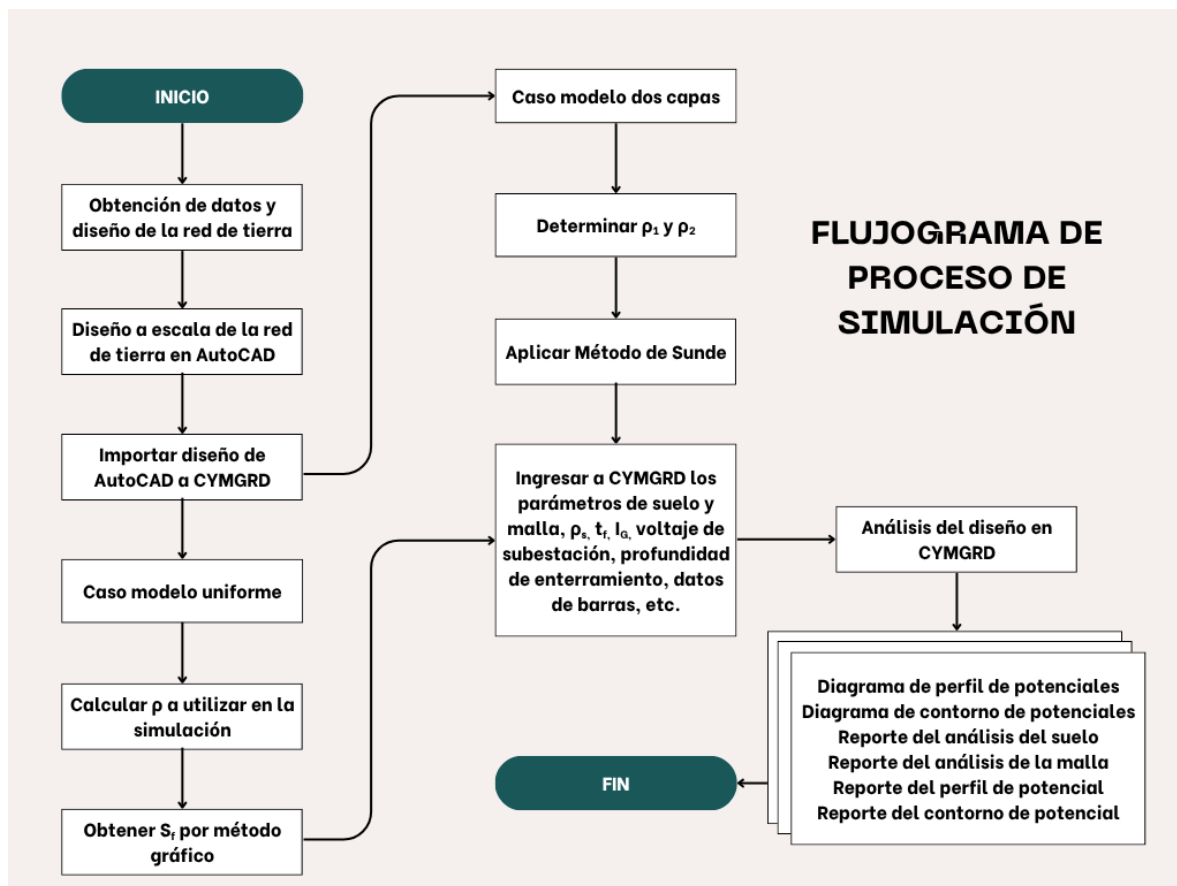


Figura 4.40. Flujograma del proceso para simular en CYMGRD

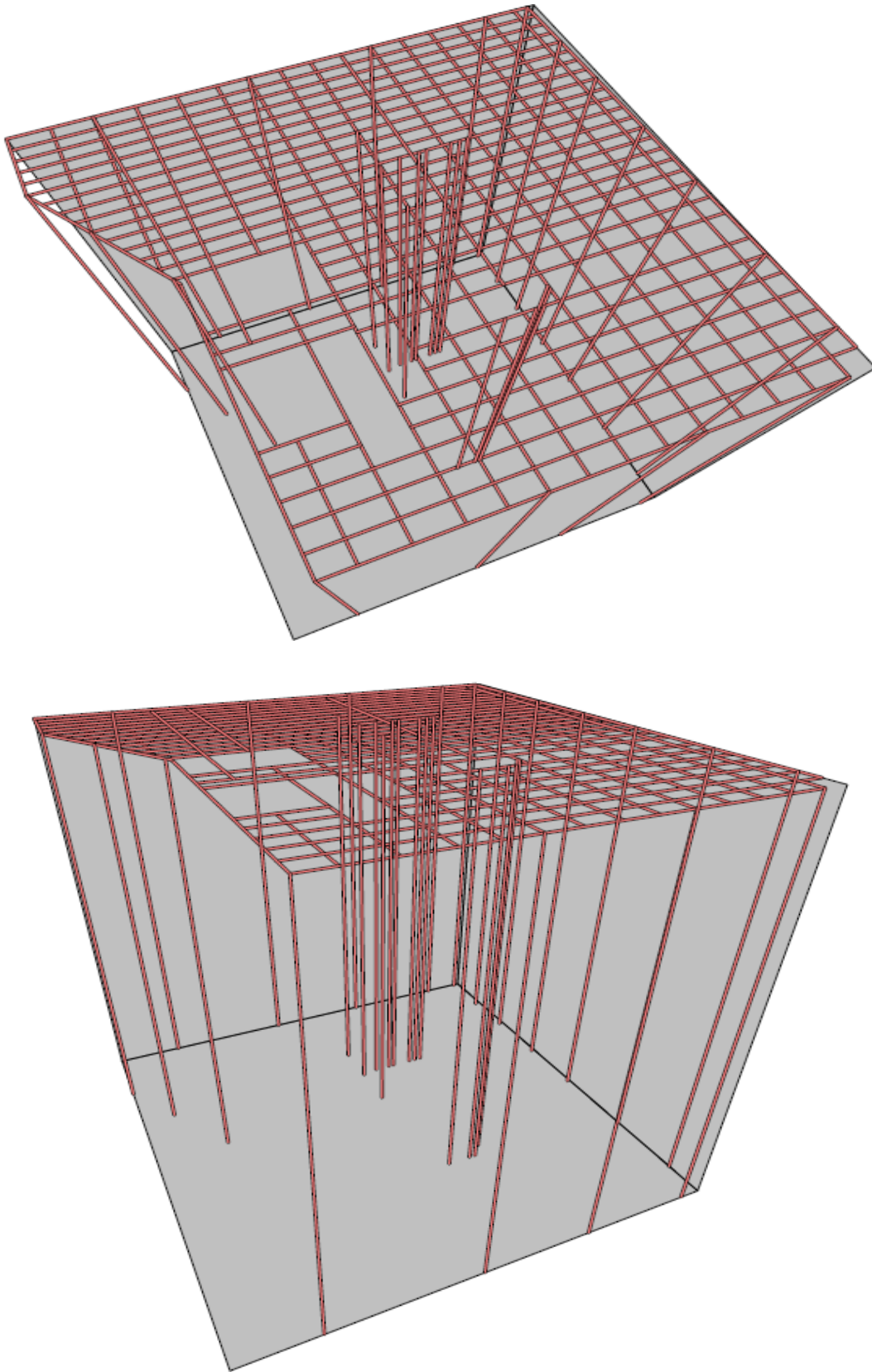


Figura 4.41. Cuadrícula 3D de la Subestación Apopa-ETESAL modelada en CYMGRD

4.6 Características físicas de la cuadrícula

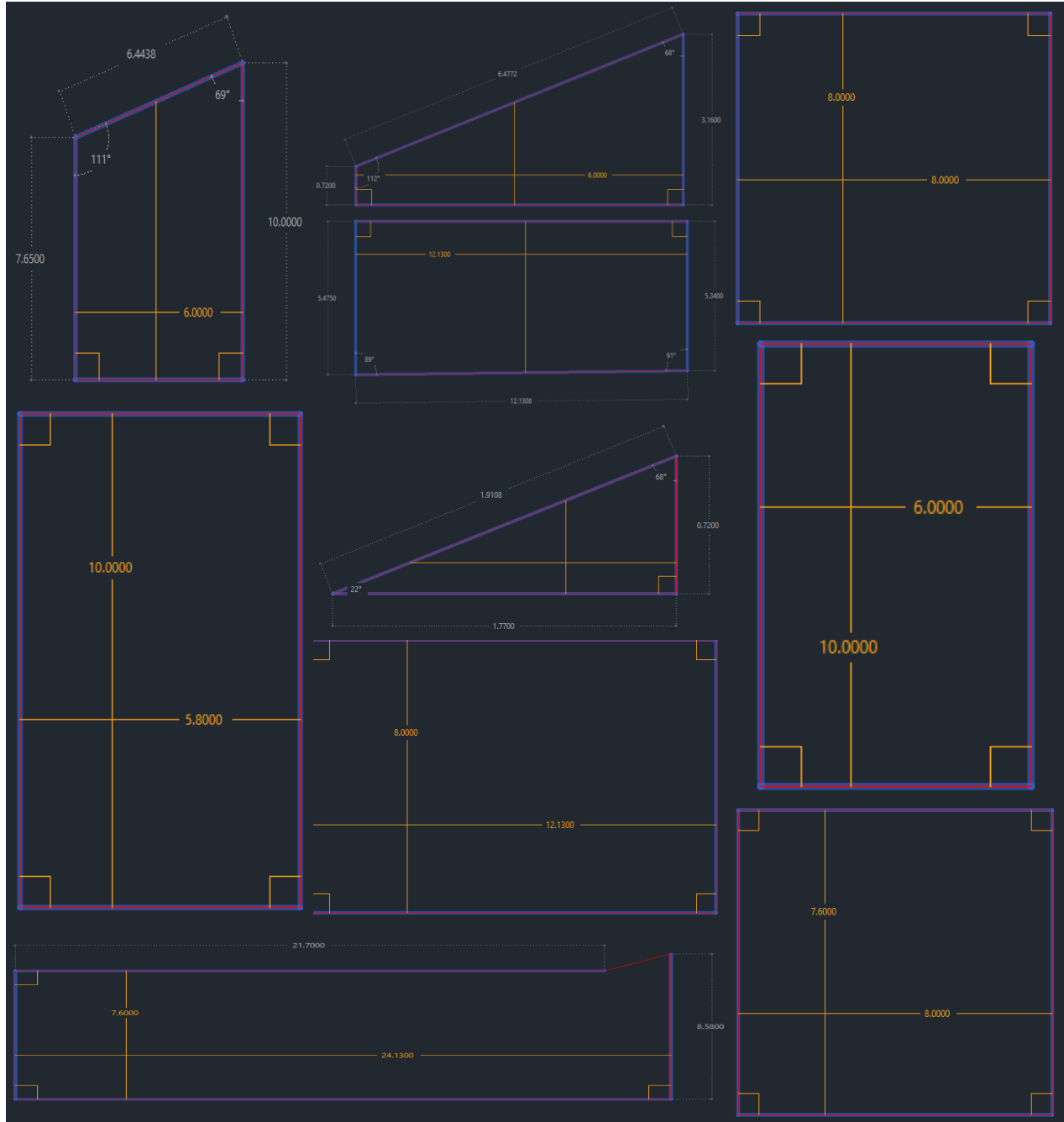


Figura 4.42. Geometría de algunas mallas irregulares de la cuadrícula de tierra de la Subestación Apopa-ETESAL

En la zona de transmisión se identificó una red de puesta a tierra correspondiente a una subestación recientemente construida, instalada en un terreno con baja resistividad eléctrica.

La cuadrícula de puesta a tierra tiene una profundidad de 0.5 m y presenta una configuración geométrica no uniforme, conformada por conductores dispuestos en formas diversas tales como trapecios, triángulos, cuadrados y rectángulos, como se ilustra en la figura 4.42. Esta diversidad geométrica puede responder a criterios de adaptación al terreno, distribución de equipos o requerimientos específicos de diseño eléctrico y de seguridad.

4.7 Datos y características de diseño proporcionados

Para la siguiente modelación se utilizarán los valores de resistividad proporcionados por ETESAL de la Subestación de Apopa.

Las medidas de resistividad del suelo en el terreno de la nueva subestación Apopa, se realizaron bajo las siguientes condiciones:

- Fecha: 6 de febrero de 2017.
- Hora de las medidas: 11:34 - 14:00 horas.
- Temperatura ambiente: 35.0 °C.
- Condición del clima: Soleado.
- Última lluvia registrada: Desconocida.
- Instrumento utilizado: Equipo medidor de resistividad marca AEMC, modelo 6472.
- Puntos de medición: 5 en dos sitios diferentes.

N° de medida	Sitio	Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Distancia entre electrodos (m)
1	Poste entrada de líneas	82.3	1.7
2	Poste entrada de líneas	53.0	3.4
3	Subestación	12.9	4
4	Subestación	16.2	8
5	Subestación	27.7	16

Tabla 4.3. Datos de resistividad de la Subestación Apopa en diferentes puntos

En el primer caso se analizará la red de tierra de la Subestación Apopa con un modelo de suelo uniforme. Se realiza un promedio para obtener el valor de resistividad de suelo uniforme.

$$\rho_a = \frac{82.3 + 53 + 12.9 + 16.2 + 27.7}{5} = 38.42 \Omega \cdot m$$

La subestación Apopa cuenta con las siguientes características de diseño:

- $\rho_a = 38.42 \Omega \cdot m$, $S_f = 0.9$
- Resistividad de la capa superficial $\rho_s = 2,500 \Omega \cdot m$.
- Duración de tiempo de falla $t_f = 1$ s.
- Peso corporal 70 kg.
- Corriente de falla $3I_0 = 10,000$ A.
- Voltaje de la subestación 115 kV.
- Espesor de la capa superficial $h_s = 0.1$ m.

Para calcular el valor del factor de división de corriente hacemos uso de la figura C.4 de la norma IEEE Std80-2013 a través del método gráfico es necesario conocer la cantidad de cables de guarda y de neutro que se interconectan en la subestación, luego se selecciona la curva correspondiente junto con el valor de la resistencia de tierra, el cual es $R_g = 0.06 \Omega$, se hace una aproximación y se obtiene $R_g = 0.1 \Omega$, dando como resultado un valor de $S_f = 0.9$.

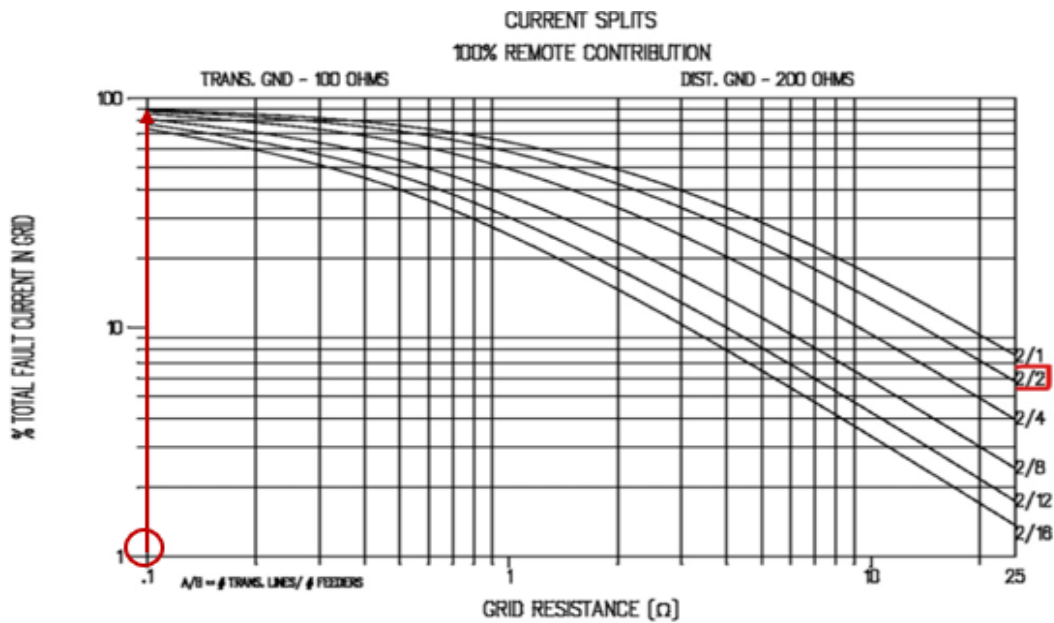


Figura 4.43. Curva para aproximar el factor de división S_f

4.8 Modelación de la cuadrícula de tierra en la SE Apopa-ETESAL con suelo uniforme

Los resultados son los siguientes:

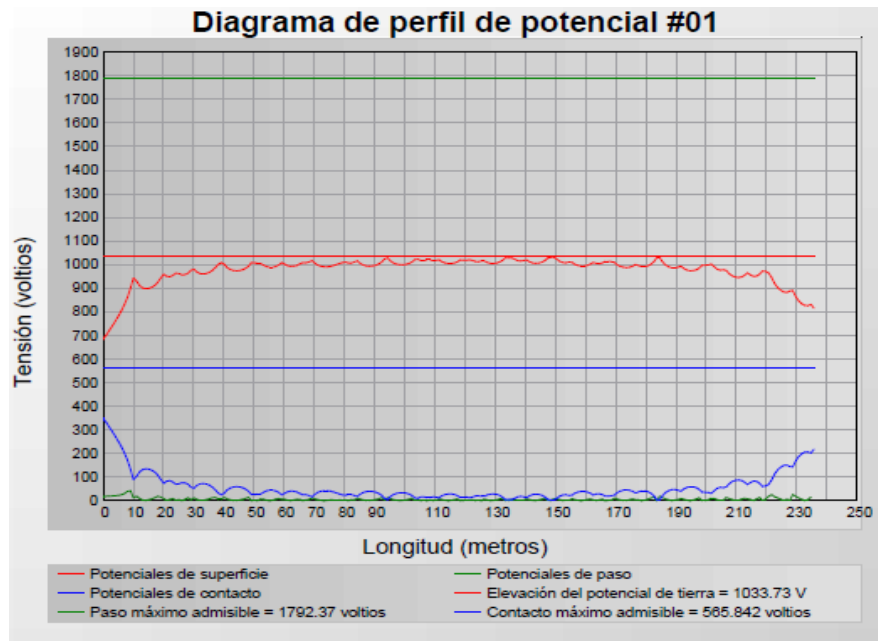


Figura 4.44. Perfil de potenciales de toque y de paso de la Subestación Apopa en CYMGRD

Las gráficas de color rojo azul y verde con valores constantes representan los límites tolerables de voltajes de paso y de toque. Las demás curvas representan los valores máximos alcanzados en la red de puesta a tierra, las cuales están por debajo, lo cual indica que el diseño de la red de puesta a tierra es seguro.

En la figura 4.44 se obtienen los valores máximos de los potenciales de superficie, potencial de paso $E_{step} = 42.21 \text{ V}$, potencial de contacto $E_{touch} = 348.948 \text{ V}$, elevación de potencial de tierra $GPR = 1033.73 \text{ V}$, paso máximo admisible y contacto máximo admisible.

Niveles de umbral del potencial de contacto	
Elevación del potencial de tierra	1033.73 voltios
Tensión máxima admisible de paso	1792.37 voltios
Tensión máxima admisible de contacto	565.842 voltios
Máximo	
Potenciales de superficie	1031.4 voltios
Potenciales de paso	42.21 voltios
Potenciales de contacto	348.948 voltios
La tensión de paso máxima es inferior al límite tolerable	

Figura 4.45. Voltajes de paso y de toque Subestación Apopa en CYMGRD

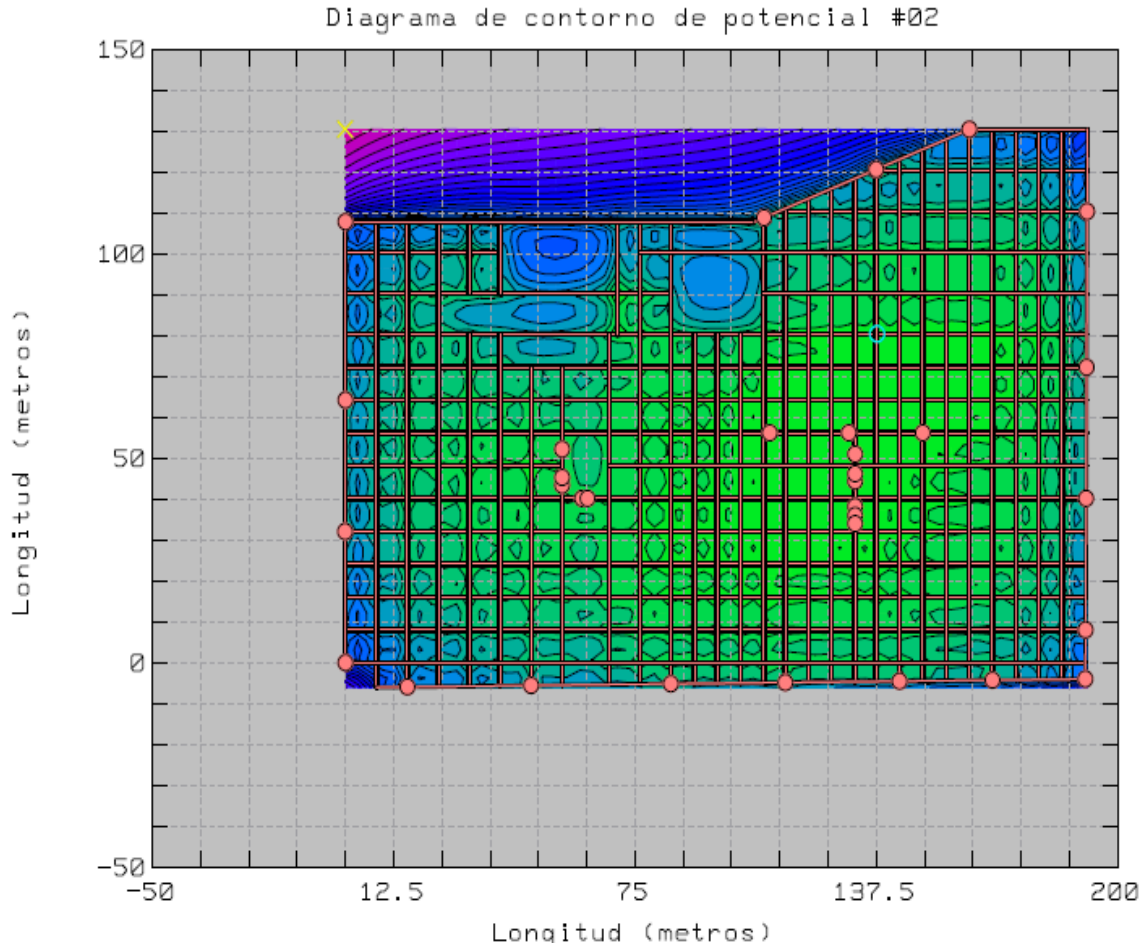


Figura 4.46. Diagrama de contorno de la Subestación Apopa-ETESAL en CYMGRD

Tal como se muestra en la figura el diseño de la cuadrícula de puesta a tierra es seguro, dado que el color del nivel de umbral de potencial de contacto se encuentra en su mayoría en un 12% del valor máximo. Las partes en color azul representan los potenciales más altos entre un 35% y 65% en las esquinas y en los lugares donde las cuadrículas presentan menor conductor.

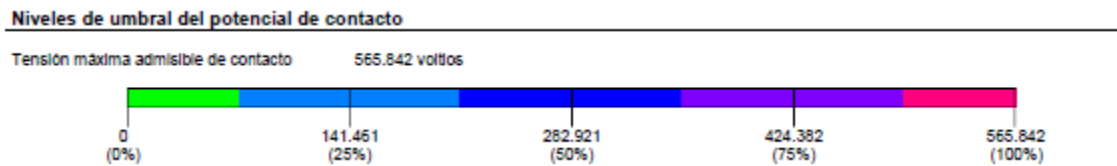


Figura 4.47. Niveles de umbral de potencial de contacto de la Subestación Apopa

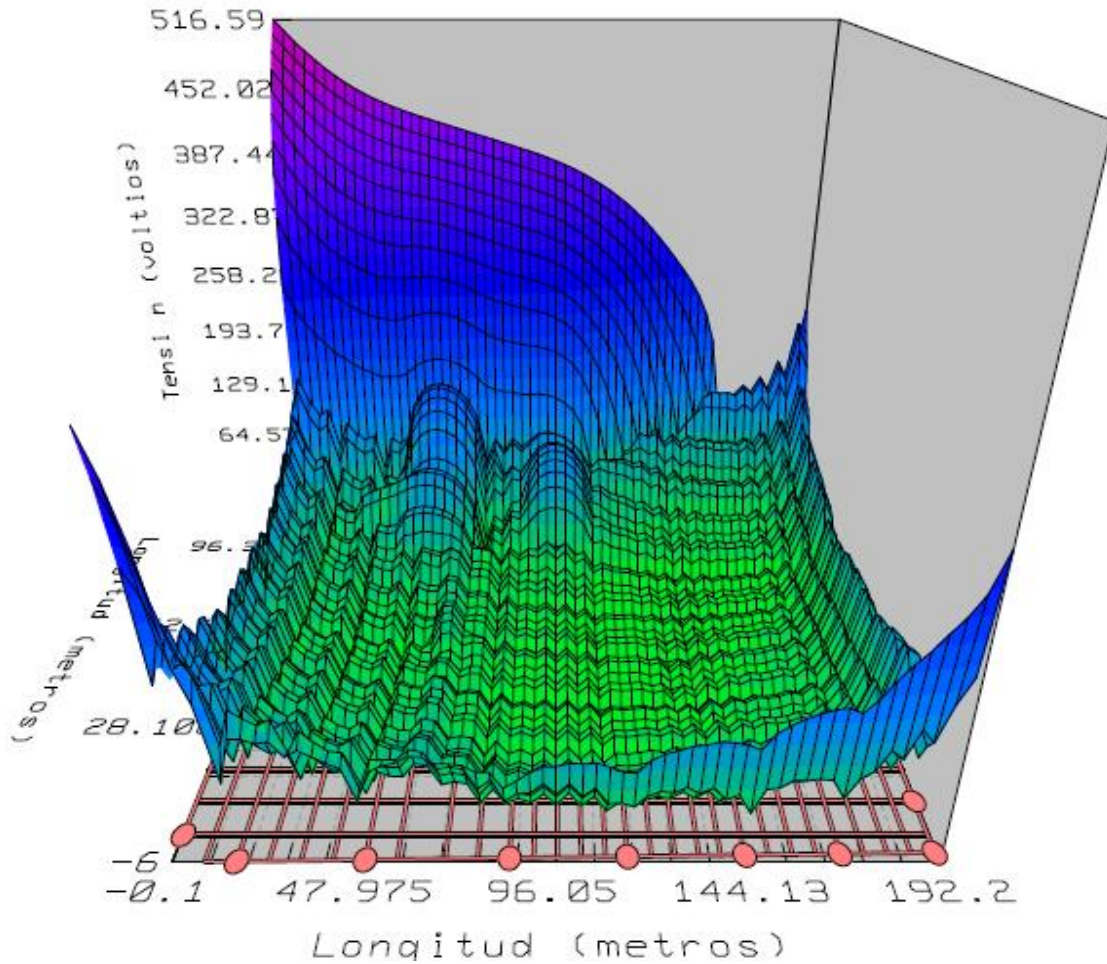


Figura 4.48. Grafica 3D de la Subestación Apopa-ETESAL en CYMGRD

En este caso el comportamiento de los voltajes dentro de la cuadrícula son bastante uniformes, excepto en los extremos de las cuadrículas, donde se muestra el color azul que representa los mayores voltajes. En uno de los extremos de la gráfica se presenta un aumento más pronunciado de los voltajes de la cuadrícula, esto es debido a que en esa parte no existe conductor.

Reporte de análisis de la malla			
Resultados de salida			
Z paralelo	1.02028 ohmios	Elevación del potencial de tierra	1033.73 voltios
Factor de decremento	1.01318	Resistencia de tierra calculada	0.113365 ohmios
		Resistencia equivalente	0.102029 ohmios

Figura 4.49. Valores de resistencia de tierra y GPR de la Subestación Apopa en CYMGRD

Para este caso, el uso de las herramientas desarrolladas en la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador: la hoja de cálculo correspondiente a la Actividad 131 y el programa RPAT no se realizó debido a que no son aptas para el modelado de geometrías de mallas irregulares como las presentes en la Subestación Apopa-ETESAL. Esto se debe a que el modelo basado en la norma IEEE Std 80-2013 presenta limitaciones respecto a la configuración geométrica de las mallas, siendo aplicable únicamente a disposiciones regulares tales como cuadradas, rectangulares, triangulares, en forma de T o en forma de L.

4.9 Modelación de la cuadrícula de tierra SE Apopa-ETESAL con suelo de dos capas

Ahora se realiza una simulación con un modelo de suelo de dos capas. La configuración de la red de tierra es la misma de la figura 4.41.

Para realizar aproximación del suelo de dos capas se utilizará el Método de Sunde, el cual se realizará de la siguiente manera:

- a) Realizar un gráfico según los datos de la tabla 4.3.
- b) Calcular ρ_1 y ρ_2 , ρ_a (a_{v1}) corresponde a ρ_1 para una separación más pequeña y ρ_a (a_{v2}) a ρ_2 para una separación más grande.
 $\rho_1 = 110 \Omega \cdot m$ y $\rho_2 = 14.6 \Omega \cdot m$.
- c) $\rho_1 / \rho_2 = 14.6 / 110 = 0.13$. Por tanto, se deberá trazar una curva $\rho_1 / \rho_2 = 0.13$.
- d) Seleccionar $\rho_a / \rho_1 = 0.30$.
- e) $a/h = 2.1$ de la figura 4.50.
- f) Cálculo de ρ_a : $\rho_a = 0.30\rho_1 = 0.30(110 \Omega \cdot m) = 33 \Omega \cdot m$.
- g) Obtener $a = 3.6$ m de la Figura 4.51 para $\rho_a = 33 \Omega \cdot m$.
- h) Cálculo de h : $h = \frac{a}{a/h} = 1.71$ m.

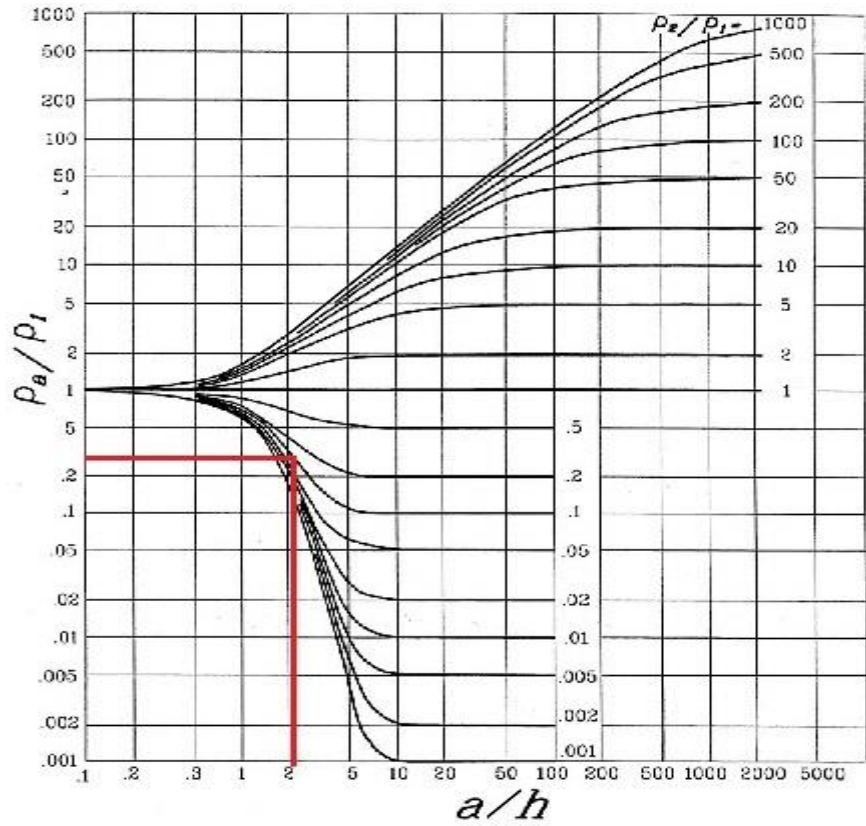


Figura 4.50. Gráfico de Sunde



Figura 4.51. Gráfica para determinar "a" de la curva de resistividad aparente

Luego de aplicar el Método de Sunde los datos para realizar la simulación con suelo de dos capas son los siguientes:

- $\rho_1 = 110 \Omega \cdot m$ y $\rho_2 = 14.6 \Omega \cdot m$.
- Altura de la capa superior $H = 1.71 m$.
- Resistividad de la capa superficial $\rho_s = 2,500 \Omega \cdot m$.
- Duración de tiempo de falla $t_f = 1 s$.
- Peso corporal 70 kg.
- $S_f = 0.9$.
- Corriente de falla $3I_0 = 10,000 A$.
- Voltaje de la subestación 115 kV.
- Espesor de la capa superficial $h_s = 0.1 m$.

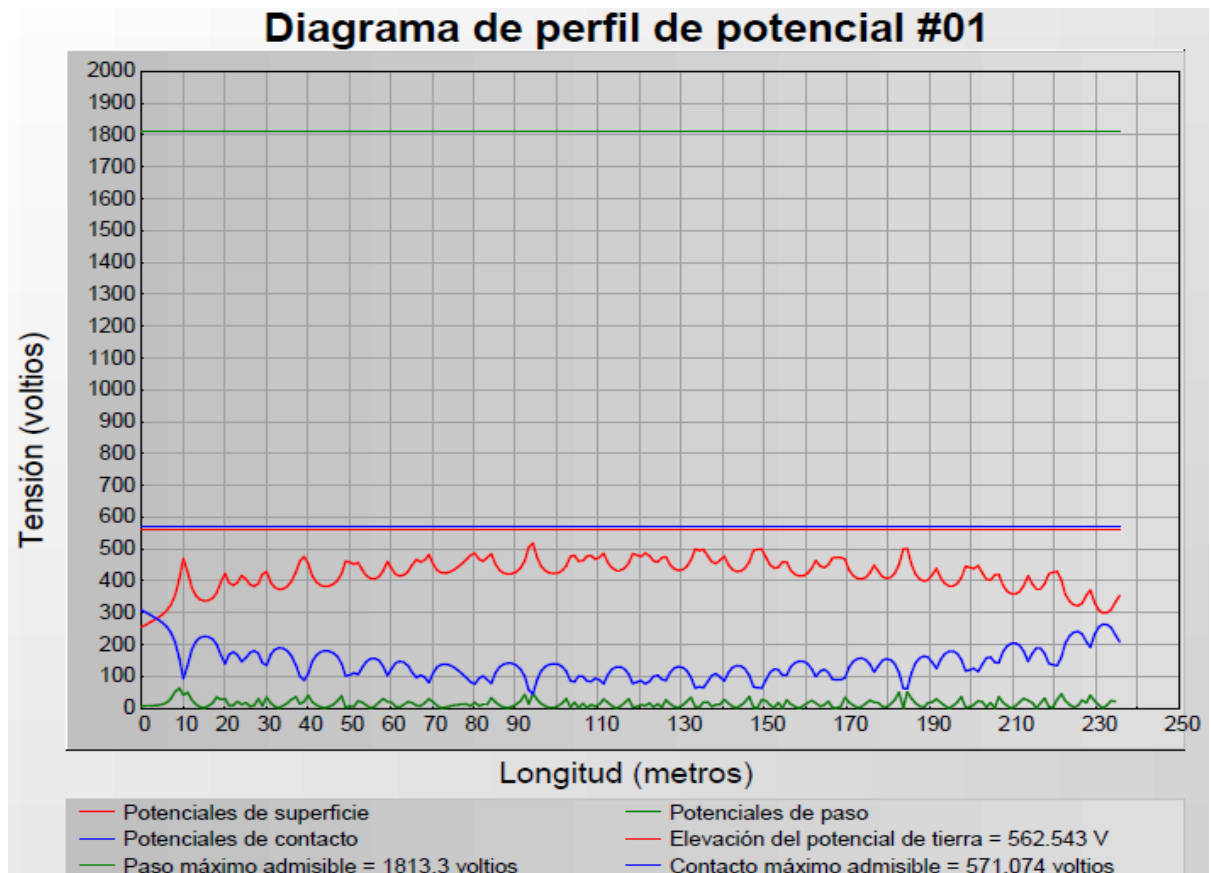


Figura 4.52. Diagrama de perfil de potencial de la subestación Apopa-ETESAL en CYMGRD

El comportamiento de los valores límites de los voltajes de paso y de toque se muestran en las gráficas de valor constante. Las curvas de color rojo, negro y azul tienen valores menores a los límites. Además, los valores de los voltajes de toque y de paso son menores comparados con la modelación de suelo uniforme.

Niveles de umbral del potencial de contacto

Elevación del potencial de tierra	562.543 voltios
Tensión máxima admisible de paso	1813.3 voltios
Tensión máxima admisible de contacto	571.074 voltios

Máximo

Potenciales de superficie	517.86 voltios
Potenciales de paso	63.19 voltios
Potenciales de contacto	307.353 voltios

La tensión de paso máxima es inferior al límite tolerable

Figura 4.53. Valores de voltaje de paso y de toque máximos en suelo de dos capas

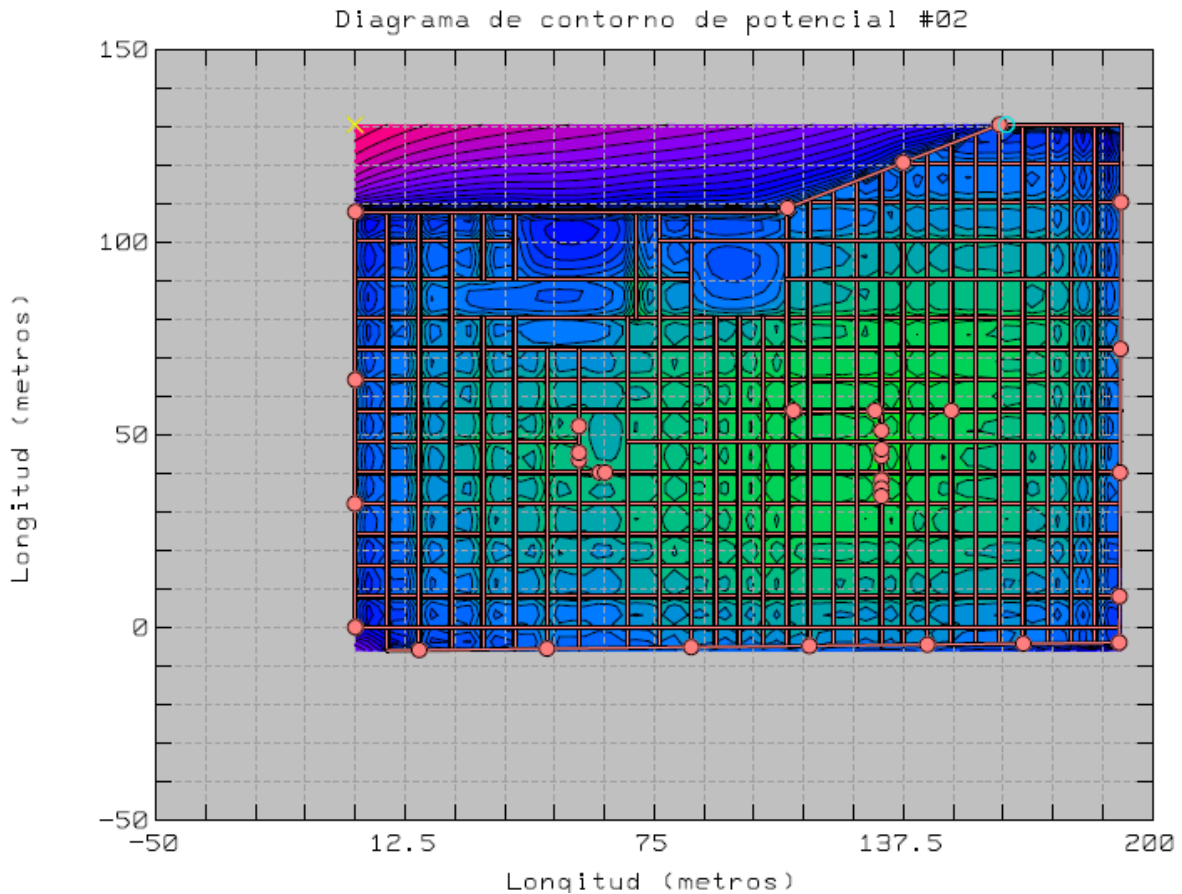


Figura 4.54. Diagrama de contorno de la subestación Apopa-ETESAL en CYMGRD

Los voltajes de potencial de contacto de la figura anterior muestran que los contornos de la cuadrícula de puesta a tierra en su mayoría son azul y verde, por lo que su rango de nivel de umbral de potencial de contacto se encuentra entre el 12% y el 65% con lo cual se tiene un diseño de la red de puesta a tierra.

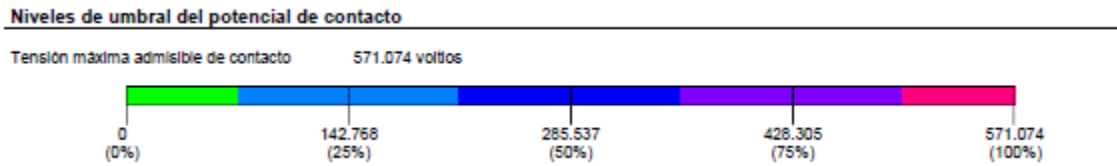


Figura 4.55. Niveles de umbral de potencial de contacto en suelo de dos capas

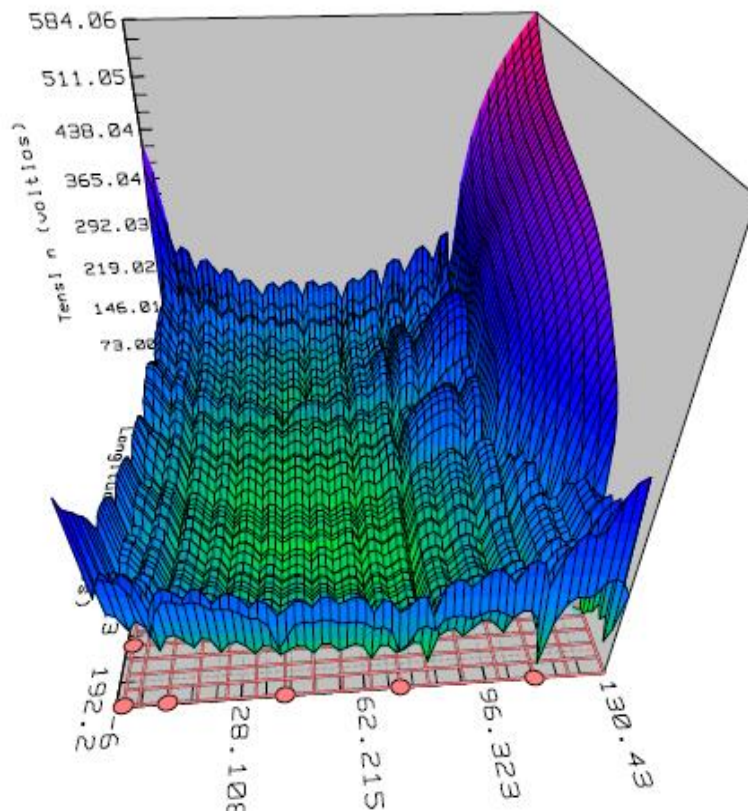


Figura 4.56. Grafica 3D de la Subestación Apopa en suelo de dos capas en CYMGRD

Al igual que en el caso del modelo de suelo uniforme, los voltajes dentro de la cuadrícula se mantienen relativamente uniformes, con la diferencia de que en esta ocasión la mayor parte de la cuadrícula presenta un color azul. De manera similar, la gráfica muestra un aumento más pronunciado de los voltajes en uno de los extremos de la cuadrícula, lo cual se debe a la ausencia de un conductor en esa zona.

Reporte de análisis de la malla

Resultados de salida

Z paralelo	0.555222 ohmios	Elevación del potencial de tierra	562.543 voltios
Factor de decremento	1.01318	Resistencia de tierra calculada	0.061692 ohmios
		Resistencia equivalente	0.0555227 ohmios

Figura 4.57. Valores de la resistencia de puesta a tierra y GPR de la Subestación Apopa-ETESAL en CYMGRD

Las herramientas como la Actividad 131 y el programa RPAT no son útiles en este caso tal como se explicó en el modelo de suelo uniforme de la Subestación Apopa-ETESAL debido al diseño irregular que presenta la cuadrícula de tierra.

4.10 Resultados de los parámetros obtenidos en las simulaciones de suelo uniforme y suelo de dos capas con CYMGRD

La siguiente tabla muestra los valores de resistividad ρ , resistencia de tierra R_g , aumento de potencial de tierra GPR y los potenciales máximos de cuadrícula tales como el potencial de toque E_t y el potencial de paso E_s .

Parámetros de puesta a tierra obtenidos en suelo uniforme					Parámetros de puesta a tierra obtenidos en suelo de dos capas				
$\rho(\Omega \cdot m)$	$R_g(\Omega)$	$E_s(V)$	$E_t(V)$	$GPR(V)$	ρ_1, ρ_2, h $\Omega \cdot m, \Omega \cdot m, m$	$R_g(\Omega)$	$E_s(V)$	$E_t(V)$	$GPR(V)$
38.42	0.11	42.21	348.95	1033.73	110, 14.6, 1.71	0.06	63.19	307.35	562.54

Tabla 4.4. Parámetros de puesta a tierra obtenidos en suelo uniforme comparado con los obtenidos en suelo de dos capas de la SE Apopa-ETESAL usando CYMGRD

Los resultados obtenidos evidencian variaciones entre los parámetros evaluados. Sin embargo, el modelo de suelo estratificado en dos capas presenta resultados con un mayor grado de precisión, lo cual se atribuye a su capacidad para representar de forma más realista la composición y estructura de suelo. Esta aproximación permite una caracterización más adecuada del comportamiento del suelo frente a la circulación de corriente, aspecto fundamental para el diseño eficiente y seguro de sistemas de puesta a tierra.

4.11 Investigación y trabajo de campo

Se llevó a cabo una investigación técnica en campo con el objetivo de documentar y analizar las prácticas de conexión a tierra aplicadas a los distintos componentes de una subestación de potencia. Los resultados de dicha investigación se evidencian en las imágenes que se presentan a continuación, las cuales ilustran las configuraciones y prácticas implementadas en un sistema de puesta a tierra.



Figura 4.58. Puesta a tierra del chasis de un transformador de potencia

Los transformadores son de suma importancia en la operación de las subestaciones eléctricas. Para garantizar su funcionamiento seguro y confiable, es indispensable su adecuada conexión al sistema de puesta a tierra, la cual proporciona una vía de descarga para corrientes de falla y contribuye a la estabilidad del potencial eléctrico de sus partes metálicas expuestas. En la figura se aprecia la interconexión de la carcasa del transformador con la malla de puesta a tierra de la subestación. Es posible que se requieran múltiples puntos de conexión a tierra, cuya disposición y cantidad deben verificarse conforme a las especificaciones técnicas del fabricante y a los criterios normativos aplicables.



Figura 4.59. Puesta a tierra del neutro de un transformador de potencia

El punto neutro del transformador debe estar conectado de manera directa a la red de puesta a tierra de la subestación, con el propósito de garantizar la equipotencialidad del sistema y establecer una trayectoria de baja impedancia para la circulación de corrientes de falla. Esta conexión es fundamental ya que permite una operación segura y confiable en la operación del sistema ante eventos de falla a tierra.



Figura 4.60. Puesta a tierra estructuras de subestación



Figura 4.61. Puesta a tierra de interruptores de potencia de 115 kV



Figura 4.62. Puesta a tierra chasis metálico de tableros

Las estructuras mecánicas de los equipos, además de proporcionar soporte físico, pueden actuar como conductores de corriente en condiciones de falla eléctrica. Por este motivo, deben estar equipadas con un sistema de conexión a tierra a través de sus carcasas metálicas. Esta conexión se efectúa mediante un conductor de puesta a tierra que se une directamente a las partes metálicas expuestas de los equipos, conforme se ilustra en las figuras 4.60, 4.61 y 4.62.



Figura 4.63. Puesta a tierra descargadores de sobretensión

Los descargadores de sobretensión desempeñan un papel fundamental en la protección y operación confiable de los transformadores, al proporcionar un camino de baja impedancia para la derivación de sobretensiones transitorias, ya sean de origen atmosférico o por maniobras en el sistema eléctrico. Estos dispositivos están equipados con contadores de descargas, los cuales registran el número de eventos de conducción, permitiendo llevar un control de las sobretensiones disipadas en un intervalo de tiempo determinado y facilitando el análisis del estado operativo del equipo.



Figura 4.64. Puesta a tierra de seccionador de entrada de 115 kV

Los seccionadores de entrada constituyen un punto crítico dentro del sistema de maniobra debido a su función en la operación y aislamiento de circuitos. Durante su manipulación, existe el riesgo de aparición de fallas eléctricas derivadas de errores operativos o condiciones anómalas, lo cual representa un peligro para el personal de la subestación. Para mitigar este riesgo, se implementa una malla equipotencial o alfombra de seguridad conectada al sistema de puesta a tierra principal, con el objetivo de minimizar las diferencias de potencial de paso y de contacto en la zona de operación. Para estos dispositivos de maniobra, es común la instalación de mallas con dimensiones de aproximadamente 1.2 m x 1.0 m y una separación entre conductores de 20 cm.



Figura 4.65. a) Mediciones de red de tierra



Figura 4.65. b) Mediciones de red de tierra



Figura 4.66. Charla técnica Ayutuxtepeque-CAESS



Figura 4.67. Visita técnica Subestación Soyapango-ETESAL

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento por el valioso apoyo brindado durante el desarrollo de nuestro trabajo de graduación a las siguientes empresas:

Agradecemos a EATON, que por medio de su representante ACI, nos proporcionó la licencia de uso del software CYMGRD, herramienta fundamental para la simulación y el análisis de redes de tierra presentadas en este trabajo. A ETESAL, por facilitarnos una visita técnica a la Subestación Soyapango, donde tuvimos la oportunidad de realizar mediciones de resistividad de suelo, nos impartieron una ponencia dirigida a nuestro tema de investigación y nos brindaron los datos y diseño de la red de tierra de la Subestación Apopa. Además, a la empresa AES, por su generoso aporte a través de una charla técnica impartida por un profesional de ingeniería, quien compartió sus conocimientos sobre redes de tierra, enriqueciendo significativamente nuestra comprensión del tema y por brindarnos los datos y diseño de la red de tierra de la Subestación Bululú.

CONCLUSIONES

1. En el sistema de Distribución, la cuadrícula de puesta a tierra se instaló en suelo de baja resistividad utilizando una configuración de cuadrícula con geometría cuadrada. En el sistema de Transmisión, se evaluó una cuadrícula de puesta a tierra de una subestación construida recientemente. La cuadrícula es en su mayoría cuadrada, aunque con dimensiones variables entre segmentos debido a que se adaptó a la forma del terreno. La profundidad de enterramiento para ambos casos fue de 0.5 m.
2. Las entrevistas con profesionales en diseño de sistemas de puesta a tierra indican que no se presentan inconvenientes para controlar el GPR ya que se analizan estos parámetros desde el diseño. Las simulaciones realizadas de las subestaciones Apopa-ETESAL y Bululú-CLESA confirmaron que el GPR, así como los potenciales de contacto y paso, se mantienen dentro de los límites tolerables.

3. En las subestaciones analizadas, se adoptaron diferentes valores de S_f . En Bululú-CLESA se utilizó un S_f de 1.0, lo que significa que toda la corriente de falla a tierra es absorbida por su sistema de puesta a tierra. En cambio, en la subestación Apopa-ETESAL se asumió un S_f de 0.9, indicando que el 90 % de la corriente es disipada a través de la cuadrícula de puesta a tierra de la subestación, esto es debido a que tiene un bajo valor de R_g mientras el 10% restante se va a disipar por medio de los conductores de guarda y de neutro.
4. La interconexión de cables de guarda y neutro en subestaciones es una práctica que presenta beneficios para el sistema de puesta a tierra, este efecto se debe a que, a medida que aumenta el número de conexiones, el S_f disminuye, lo que implica que la corriente de falla disipada por la cuadrícula de la subestación será menor, reduciendo con ello el GPR y los potenciales de toque y de paso que permite la cuadrícula.
5. Los análisis comparativos entre terrenos de resistividad homogénea y de dos capas evidenciaron mejores resultados eléctricos en los suelos estratificados. En las simulaciones realizadas con CYMGRD se observó menor resistencia de puesta a tierra y gradientes de potencial más seguros en los terrenos de dos capas, considerando que la segunda capa era más conductiva (con K negativo). Esto resalta la importancia de caracterizar correctamente el perfil del suelo para lograr diseñar sistemas más confiables y eficientes.
6. El análisis comparativo entre las herramientas RPAT, Actividad No.131 y el software CYMGRD, demuestra mínimas variaciones en los resultados para los casos que la configuración geométrica de las mallas lo permiten. Esto valida la confiabilidad del modelo analítico basado en la norma IEEE Std 80-2013. CYMGRD destaca por su capacidad de modelar configuraciones más complejas como las que presenta el caso de la Subestación Apopa-ETESAL.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEEE Std 80™-2013, *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*.
- [2] IEEE Std 81™-2012, *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*.
- [3] National Fire Protection Association, *NFPA 70: National Electrical Code*, 2008.
- [4] IEEE Std 80™-2000, *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*.
- [5] Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET), *Acuerdo No. 29-E-2000: Normas técnicas de diseño, seguridad y operación de las instalaciones de distribución eléctrica*, 2000. [Online]. Available: <https://www.transparencia.gob.sv/institutions/siget/documents/otros-documentos-normativos>.
- [6] M. De la Vega Ortega, *Problemas de ingeniería de puesta a tierra*, 2nd ed., Grupo Noriega Editores, 2002.
- [7] A. Montenegro y S. Montes, *“Aplicación del electromagnetismo computacional al cálculo de redes a tierra”*, Universidad de El Salvador, 2018. [Online]. Available: <https://oldri.ues.edu.sv/id/eprint/17627/>.
- [8] J. Arriola y J. Rodríguez, *“Desarrollo de un simulador para el diseño de redes de tierra de subestaciones de potencia basado en el estándar IEEE 80-2000”*, Universidad de El Salvador, 2016. [Online]. Available: <https://oldri.ues.edu.sv/id/eprint/10352/>.
- [9] U. Choque, *Trabajo Dirigido - Diseño de mallas de tierra-CYMGRD*. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/presentation/613800084/Trabajo-Dirigido-Diseno-de-mallas-de-tierra-CYMGRD>.

[10] Puesta a tierra. (s.f.). Analfatecnicos.net. [Online]. Available: <https://analfatecnicos.net/archivos/08.PuestaATierra.pdf>.

[11] Inel - Escuela Técnica de Ingeniería, "Diseño de Malla a tierra con el Método de Elementos Finitos," YouTube, Jan. 11, 2021. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=xPDS-J9kOAI>.

[12] ESFOT_EPN, "Tema: «Diseño de Sistemas de Puesta a Tierra con el Método de Elementos Finitos»," YouTube, Mar. 26, 2021. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=FP3dlgHAyYw>.

[13] F. Dawalibi y D. Mukhedkar, "Parametric analysis of grounding systems," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-98, no. 5, pp. 1659–1668, 1979.

[14] M. Brenna, F. Foiadelli, M. Longo, y D. Zaninelli, "Particular grounding systems analysis using FEM models," in *Proc. Int. Conf. Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2018, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378860>.

[15] G. Aiello, S. Alfonzetti, S. A. Rizzo, y N. Salerno, "Efficient analysis of grounding systems by means of the hybrid FEM–DBCI method," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 6, pp. 5159–5166, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2414703>.

[16] H. Zhao, S. Fortin, y F. P. Dawalibi, "Analysis of grounding systems including freely oriented plates of arbitrary shape in multilayer soils," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 6, pp. 5189–5197, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2414701>.

ANEXOS

Reporte global de Subestación Apopa-ETESAL modelo de dos capas en CYMGRD

CYME International T&D
CYMGRD, Programa de diseño de sistemas de puesta a tierra
Versión 8.0 Revisión 1

Nombre de la subestación: APOPA-2C
 Proyecto: APOPA-2C
 Estudio: APOPA-2C
 Número de conductores de puesta a tierra: 54
 Número de varillas de puesta a tierra: 64
 Longitud total de los conductores de puesta a tierra: 6258.55 metros
 Longitud total de las varillas de puesta a tierra: 97.536 metros

Datos de entrada sobre el suelo

Materiales de superficie

Definido por el usuario
 Resistividad de la capa superficial: 2500 ohm-m
 Espesor de la capa superficial: 0.1 metros

Material de la capa de arriba

Definido por el usuario
 Resistividad de la capa superior: 110 ohm-m
 Espesor de la capa superior: 0.1 metros

Material de la capa de abajo

Definido por el usuario
 Resistividad de la capa inferior: 110 ohm-m

Datos de entrada del sistema

Corriente de falla a tierra							Duración de la falla (segundos)	
Frecuencia nominal	Peso corporal	Temperatura ambiente	Corriente de falla total	LG X/R	Factor de corte	Factor de decremento	Tf para Duración de la falla	Ts para Duración del choque eléctrico
60 hz	70 kg	40 °C	10000 amps	100	0.9	1.01316	1 secs	1 secs

Conductores asimétricos

Activado	Tipo	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Número de elementos conductores	Material	Tamaño	Diámetro (mm)	Material del revestimiento	Ancho superior (mm)
X	Primario	0	8.018	0.5	191.714633	8.018	0.5	1			11.68		
X	Primario	0	15.9713	0.5	191.746168	15.9713	0.5	1			11.68		
X	Primario	0	24.058	0.5	191.778232	24.058	0.5	1			11.68		
X	Primario	0	32.076	0.5	191.810023	32.076	0.5	1			11.68		
X	Primario	0	40.1627	0.5	191.842087	40.1627	0.5	1			11.68		
X	Primario	0	48.1807	0.5	56.126	48.1807	0.5	1			11.68		
X	Primario	0	56.1987	0.5	191.905671	56.1987	0.5	1			11.68		
X	Primario	0	64.2167	0.5	191.937462	64.2167	0.5	1			11.68		
X	Primario	0	72.2347	0.5	191.969254	72.2347	0.5	1			11.68		
X	Primario	0	80.2527	0.5	192.001045	80.2527	0.5	1			11.68		
X	Primario	0	100.2277	0.5	40.09	100.2277	0.5	1			11.68		
X	Primario	0	90.2527	0.5	84.292	90.2527	0.5	1			11.68		
X	Primario	136.774185	120.3377	0.5	192.159984	120.3377	0.5	1			11.68		
X	Primario	112.173436	110.3377	0.5	192.120333	110.3377	0.5	1			11.68		
X	Primario	16.036	-5.912282	0.5	16.036	107.8243	0.5	1			11.68		
X	Primario	24.054	-5.824761	0.5	24.054	107.8243	0.5	1			11.68		
X	Primario	32.072	-5.73724	0.5	32.072	80.2527	0.5	1			11.68		
X	Primario	40.09	-5.649718	0.5	40.09	80.2527	0.5	1			11.68		
X	Primario	48.108	-5.562187	0.5	48.108	72.2347	0.5	1			11.68		
X	Primario	56.126	-5.474676	0.5	56.126	72.2347	0.5	1			11.68		
X	Primario	68.256	-5.342269	0.5	68.256	80.2527	0.5	1			11.68		
X	Primario	76.274	-5.254748	0.5	76.274	107.8243	0.5	1			11.68		
X	Primario	84.292	-5.167227	0.5	84.292	107.8243	0.5	1			11.68		
X	Primario	90.357	-5.101024	0.5	90.357	80.2527	0.5	1			11.68		
X	Primario	96.357	-5.03553	0.5	96.357	80.2527	0.5	1			11.68		
X	Primario	102.357	-4.970036	0.5	102.357	80.2527	0.5	1			11.68		
X	Primario	108.422	-4.903633	0.5	108.422	108.812773	0.5	1			11.68		
X	Primario	113.949	-4.843503	0.5	113.949	111.059452	0.5	1			11.68		
X	Primario	119.949	-4.778009	0.5	119.949	113.498402	0.5	1			11.68		
X	Primario	125.949	-4.712515	0.5	125.949	115.937352	0.5	1			11.68		
X	Primario	132.014	-4.646312	0.5	132.014	118.402724	0.5	1			11.68		
X	Primario	137.472	-4.586735	0.5	137.472	120.821356	0.5	1			11.68		
X	Primario	143.537	-4.520532	0.5	143.537	123.086728	0.5	1			11.68		
X	Primario	149.537	-4.455038	0.5	149.537	125.525678	0.5	1			11.68		
X	Primario	155.602	-4.388835	0.5	155.602	127.99105	0.5	1			11.68		
X	Primario	161.602	-4.323341	0.5	161.602	130.43	0.5	1			11.68		
X	Primario	167.602	-4.257848	0.5	167.602	130.43	0.5	1			11.68		
X	Primario	173.667	-4.191645	0.5	173.667	130.43	0.5	1			11.68		
X	Primario	179.667	-4.126151	0.5	179.667	130.43	0.5	1			11.68		
X	Primario	185.667	-4.060657	0.5	185.667	130.43	0.5	1			11.68		
X	Primario	76.274	100.2277	0.5	192.080247	100.2277	0.5	1			11.68		
X	Primario	32.072	90.2527	0.5	32.072	107.8243	0.5	1			11.68		
X	Primario	40.09	90.2527	0.5	40.09	107.8243	0.5	1			11.68		
X	Primario	70.48	80.2527	0.5	70.48	107.8243	0.5	1			11.68		
X	Primario	68.256	48.1807	0.5	191.873879	48.1807	0.5	1			11.68		
X	Primario	108.422	90.2527	0.5	192.040696	90.2527	0.5	1			11.68		
X	Primario	8	-6	0.5	8	107.8243	0.5	1			11.68		
X	Primario	0	0	0.5	0	107.8243	0.5	1			11.68		
X	Primario	0	0	0.5	191.682841	0	0.5	1			11.68		
X	Primario	8	-6	0.5	191.667002	-3.994558	0.5	1			11.68		
X	Primario	-0	107.8243	0.5	105.990283	107.8243	0.5	1			11.68		
X	Primario	105.990283	107.8243	0.5	161.602	130.43	0.5	1			11.68		
X	Primario	161.602	130.43	0.5	192.2	130.43	0.5	1			11.68		
X	Primario	191.667	-3.995164	0.5	192.2	130.43	0.5	1			11.68		

Varillas asimétricas

Activado	Tipo	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Número de varillas de tierra a lo largo del eje	Elementos por varilla en la capa superior de suelo	Elementos por varilla en la capa inferior de suelo	Longitud (m)	Material	Tamaño	Diámetro (mm)	Material del revestimiento
X	Primario	0	0	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	-0.1	32.076	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	0	64.2167	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	0	107.8243	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	108.422	108.812773	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	137.472	120.621356	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	161.502	130.43	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	192.120333	110.3377	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	191.969254	72.2347	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	191.842087	40.1627	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	191.967	-3.995164	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	191.714633	8.018	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	16.036	-5.912282	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	48.108	-5.562197	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	64.292	-5.167227	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	113.949	-4.843503	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	143.537	-4.520532	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	167.602	-4.257648	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	61.3	40.1627	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	62.7	40.1627	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	56.126	43.4	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	56.126	45.3	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	56.126	52.2	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	132.014	38.199651	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	132.014	35.996651	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	132.014	33.996651	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	132.014	44.399651	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	132.014	46.199651	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	132.014	50.999651	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	130.4	56.198351	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	149.537	56.198351	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	
X	Primario	109.9	56.198351	0.5	0	0	3.548	1	1	1	3.048			15.875	

Reporte del análisis de suelo

Parámetros

Título	APOPA-2C
Modelo de suelo	Definido por el usuario
Espesor de la capa superior	1.71 metros
Resistividad de la capa superior	110 ohm-m
Resistividad de la capa inferior	14.6 ohm-m
Modelo securitario	IEEE-80(TM) 2013
Peso corporal	70 kg
Espesor de la capa superficial	0.1 metros
Resistividad de la capa superficial	2500 ohm-m
Duración del choque eléctrico	1 secs

Resultados de salida

Factor Cs de reducción	0.70331
Tensión máxima admisible de contacto	571.074 voltios
Tensión máxima admisible de paso	1813.3 voltios

Reporte de análisis de la malla

Resultados de salida

Z paralelo	0.555222 ohmios	Elevación del potencial de tierra	562.543 voltios
Factor de decremento	1.01318	Resistencia de tierra calculada	0.061692 ohmios
		Resistencia equivalente	0.0555227 ohmios

Reporte del perfil de potencial

Parámetros

Título	Diagrama de perfil de potencial #01
Nombre de la barra	Desconocido
Corriente de falla LG	10000 amps
Contribución a distancia	100 %
Corriente del electrodo de retorno	0 amps
Factor de corte	0.9
Espesor de la capa superior	1.71 metros
Resistividad de la capa superior	110 ohm/m
Resistividad de la capa inferior	14.6 ohm/m
Potenciales iguales (distintos)	Si
X1	-0.1 metros
Y1	-6 metros
X2	192.2 metros
Y2	130.43 metros
Intervalo entre los pasos	1 metros

Niveles de umbral del potencial de contacto

Elevación del potencial de tierra	562.543 voltios
Tensión máxima admisible de paso	1813.3 voltios
Tensión máxima admisible de contacto	571.074 voltios

Máximo

Potenciales de superficie	517.86 voltios
Potenciales de paso	63.19 voltios
Potenciales de contacto	307.353 voltios

La tensión de paso máxima es inferior al límite tolerable

Reporte de contorno de potencial

Parámetros

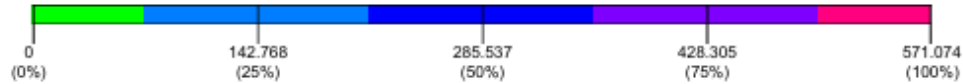
Título	Diagrama de contorno de potencial #01
Nombre de la barra	Desconocido
Corriente de falla LG	10000 amps
Contribución a distancia	100 %
Corriente del electrodo de retorno	0 amps
Factor de corte	0.9
Espesor de la capa superior	1.71 metros
Resistividad de la capa superior	110 ohm/m
Resistividad de la capa inferior	14.6 ohm/m
Potenciales iguales (distintos)	Si
X1	-0.1 metros
Y1	-6 metros
X2	192.2 metros
Y2	130.43 metros
Intervalos X	60
Intervalos Y	60

Parámetros

Título	Diagrama de contorno de potencial #01
Nombre de la barra	Desconocido
Corriente de falla LG	10000 amps
Contribución a distancia	100 %
Corriente del electrodo de retorno	0 amps
Factor de corte	0.9
Espesor de la capa superior	1.71 metros
Resistividad de la capa superior	110 ohm/m
Resistividad de la capa inferior	14.6 ohm/m
Potenciales iguales (distintos)	Si
X1	-0.1 metros
Y1	-6 metros
X2	192.2 metros
Y2	130.43 metros
Intervalos X	60
Intervalos Y	60

Niveles de umbral del potencial de contacto

Tensión máxima admisible de contacto 571.074 voltios



Mínimo

Potencial de contacto en el/los punto(s) 20.0152 voltios

X (metros)	Y (metros)
131.305	48.572

Máximo

Potencial de contacto en los puntos 375.312 voltios

Corriente LT permitida

15215.9 amps

X (metros)	Y (metros)
-0.1	130.43

La tensión de contacto máxima es inferior al límite tolerable

Reporte global de Subestación Bululú – CLESA en CYMGRD

CYME International T&D
CYMGRD, Programa de diseño de sistemas de puesta a tierra
Versión 8.0 Revisión 1

Nombre de la subestación: BULULUSUB
Proyecto: BULULUSUB
Estudio: BULULUSUB
Número de conductores de puesta a tierra: 15
Número de varillas de puesta a tierra: 12
Longitud total de los conductores de puesta a tierra: 246.044 metros
Longitud total de las varillas de puesta a tierra: 60 metros

Datos de entrada sobre el suelo

Materiales de superficie

Definido por el usuario
Resistividad de la capa superficial: 8534 ohm-m
Espesor de la capa superficial: 0.5 metros

Material de la capa de arriba

Definido por el usuario
Resistividad de la capa superior: 109 ohm-m
Espesor de la capa superior: 0.5 metros

Material de la capa de abajo

Definido por el usuario
Resistividad de la capa inferior: 109 ohm-m

Datos de entrada del sistema

Corriente de falla a tierra							Duración de la falla (segundos)	
Frecuencia nominal	Peso corporal	Temperatura ambiente	Corriente de falla total	LG X/R	Factor de corte	Factor de decremento	Tf para Duración de la falla	Ts para Duración del choque eléctrico
60 hz	50 kg	40 °C	7049 amps	100	1	1.12477	1 secs	1 secs

Conductores asimétricos

Activado	Tipo	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Número de elementos conductores	Material	Tamaño	Diámetro (mm)	Material del revestimiento	Ancho superior (mm)	Ancho inferior (mm)
X	Primario	-0.043734	0	0.5	0	0	0.5	1			10.954			
X	Primario	0	0	0.5	0	15	0.5	1			10.954			
X	Primario	0	15	0.5	21	15	0.5	1			10.954			
X	Primario	21	0	0.5	21	15	0.5	1			10.954			
X	Primario	0	12	0.5	21	12	0.5	1			10.954			
X	Primario	0	9	0.5	21	9	0.5	1			10.954			
X	Primario	0	6	0.5	21	6	0.5	1			10.954			
X	Primario	0	3	0.5	21	3	0.5	1			10.954			
X	Primario	6	0	0.5	6	15	0.5	1			10.954			
X	Primario	9	0	0.5	9	15	0.5	1			10.954			
X	Primario	12	0	0.5	12	15	0.5	1			10.954			
X	Primario	15	0	0.5	15	15	0.5	1			10.954			
X	Primario	18	0	0.5	18	15	0.5	1			10.954			
X	Primario	3	0	0.5	3	15	0.5	1			10.954			
X	Primario	0.1	0	0.5	21.1	0	0.5	1			10.954			

Varillas asimétricas

Activado	Tipo	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Número de varillas de tierra a lo largo del eje	Elementos por varilla en la capa superior de suelo	Elementos por varilla en la capa inferior de suelo	Longitud (m)	Material	Tamaño	Diámetro (mm)
X	Primario	21	15	0.5	0	0	10.5	1	1	1	10			20
X	Primario	0	0	0.5	0	0	10.5	1	1	1	10			20
X	Primario	0	15	0.5	0	0	10.5	1	1	1	10			20
X	Primario	21	0	0.5	0	0	10.5	1	1	1	10			20
X	Primario	10.5	15	0.5	0	0	10.5	1	1	1	10			20
X	Primario	10.6	0	0.5	0	0	10.5	1	1	1	10			20

Reporte del análisis de suelo

Parámetros

Título: BULULUSUB
Modelo de suelo: Definido por el usuario
Espesor de la capa superior: 1.47 metros
Resistividad de la capa superior: 109 ohm-m
Resistividad de la capa inferior: 1 ohm-m
Modelo securitario: IEEE-80(TM) 2013
Peso corporal: 50 kg
Espesor de la capa superficial: 0.5 metros
Resistividad de la capa superficial: 8534 ohm-m
Duración del choque eléctrico: 1 secs

Resultados de salida

Factor Cs de reducción: 0.918486
Tensión máxima admisible de contacto: 1479.87 voltios
Tensión máxima admisible de paso: 5571.5 voltios

Reporte de análisis de la malla

Resultados de salida

Z paralelo: 28482.5 ohmios
Factor de decremento: 1.12477
Elevación del potencial de tierra: 225.824 voltios
Resistencia de tierra calculada: 0.0284825 ohmios
Resistencia equivalente: 0.0284824 ohmios

Reporte del perfil de potencial

Parámetros

Título	Diagrama de perfil de potencial #01
Nombre de la barra	Desconocido
Corriente de falla LG	7049 amps
Contribución a distancia	100 %
Corriente del electrodo de retorno	0 amps
Factor de corte	1
Espesor de la capa superior	1.47 metros
Resistividad de la capa superior	109 ohm/m
Resistividad de la capa inferior	1 ohm/m
Potenciales iguales (distintos)	SI
X1	-0.04 metros
Y1	0 metros
X2	21.1 metros
Y2	15 metros
Intervalo entre los pasos	1 metros

Niveles de umbral del potencial de contacto

Elevación del potencial de tierra	225.824 voltios
Tensión máxima admisible de paso	5571.5 voltios
Tensión máxima admisible de contacto	1479.87 voltios

Máximo

Potenciales de superficie	169.84 voltios
Potenciales de paso	23.21 voltios
Potenciales de contacto	88.974 voltios

La tensión de paso máxima es inferior al límite tolerable

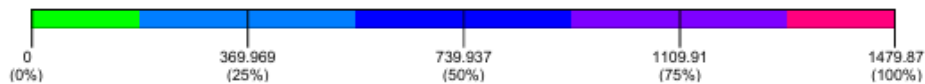
Reporte de contorno de potencial

Parámetros

Título	Diagrama de contorno de potencial #01
Nombre de la barra	Desconocido
Corriente de falla LG	7049 amps
Contribución a distancia	100 %
Corriente del electrodo de retorno	0 amps
Factor de corte	1
Espesor de la capa superior	1.47 metros
Resistividad de la capa superior	109 ohm/m
Resistividad de la capa inferior	1 ohm/m
Potenciales iguales (distintos)	SI
X1	-0.0437 metros
Y1	0 metros
X2	21.1 metros
Y2	15 metros
Intervalos X	60
Intervalos Y	60

Niveles de umbral del potencial de contacto

Tensión máxima admisible de contacto	1479.87 voltios
--------------------------------------	-----------------



Mínimo

Potencial de contacto en el/los punto(s)	44.97 voltios
------------------------------------------	---------------

X (metros)	Y (metros)
11.9377	3

Máximo

Potencial de contacto en los puntos	96.021 voltios	Corriente LT permitida	108639 amps
-------------------------------------	----------------	------------------------	-------------

X (metros)	Y (metros)
19.6904	7.5

La tensión de contacto máxima es inferior al límite tolerable