



Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



TRABAJO DE DIPLOMA

Mallas de puesta a tierra de Subestaciones típicas

Autor: Alberto García Fraga

Tutor: Dr. Ángel C. Valcárcel Rojas

Santa Clara

2014

"Año 56 de la Revolución"





Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



TRABAJO DE DIPLOMA

Mallas de puesta a tierra de Subestaciones típicas

Autor: Alberto García Fraga

e-mail: agfraga@uclv.edu.cu

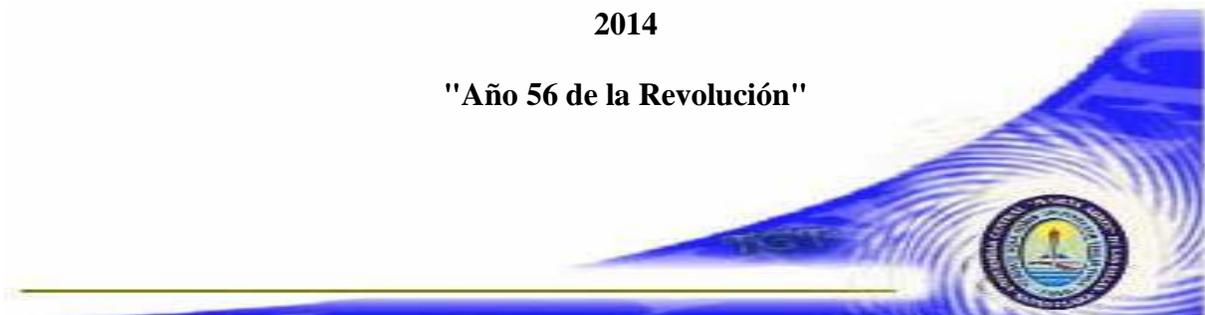
Tutor: Dr. Ángel C. Valcárcel Rojas

e-mail: valca@uclv.edu.cu

Santa Clara

2014

"Año 56 de la Revolución"





Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

*'' Si el problema tiene solución para qué te preocupas, y si
no tiene solución para qué te preocupas ''.*

Albert Einstein

DEDICATORIA

“Dedico el presente trabajo de diploma a mis padres Milagros y Alberto, que siempre confiaron en mí aún en los momentos más difíciles, y que sin su apoyo no hubiese sido posible este sueño que ellos me inculcaron de ser alguien en la vida.”

AGRADECIMIENTOS

“La gratitud es el más legítimo pago al esfuerzo ajeno, es reconocer que todo lo que somos es la suma del sudor de los demás, es tener conciencia de que un hombre solo no vale nada y que la dependencia humana además de obligada es hermosa”.

✚ A toda mi familia.

✚ A quienes han estado a mi lado en todos los momentos para darme ánimos: Humberto (El Morzo), Raulien (Pequetita), Rafael (El Pechugón), Yunier (El Hombre), Frank (El Tombo), Luiso (Pata de Palo), Ricardo (Riki) y Eduardo Flores (El Titi).

✚ A mi tutor por ofrecerme su ayuda constante, por su entrega y dedicación, lo que permitió la acertada realización de este trabajo.

✚ Y un agradecimiento muy especial a mi novia Odenmy por su gran ayuda; y por estar siempre a mi lado en los momentos buenos y malos, mi chiquitica sin ti no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

✚ Muchas Gracias a todos.

TAREA TÉCNICA

1. Realizar un estudio bibliográfico sobre sistemas de puesta a tierra.
2. Familiarización en el trabajo con el programa PAST.
3. Diseñar con la ayuda del programa PAST mallas de puesta a tierra típicas de subestaciones de 34.5/13.2 kV para diferentes condiciones de resistividad del terreno y corriente de cortocircuito.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

Los sistemas de puesta a tierra constituyen uno de los elementos más importantes de los sistemas eléctricos, tal que si no se tienen en cuenta los requisitos de diseño se podrían causar daños tanto al personal como al material de trabajo. En Cuba, la Unión Eléctrica tiene propuestos e implementados proyectos de mallas de sistemas de puesta a tierra sin observar dichos requisitos de diseño, razón por la cual en este trabajo de diploma se comprobaron las deficiencias de dichas mallas en lo que respecta al cumplimiento de requisitos de diseño como resistividad del terreno, resistencia de puesta a tierra, tensiones de paso y de contacto, para cuyo perfeccionamiento se diseñaron mallas de puesta a tierra de subestaciones de 34,5/13,2 kV teniendo en cuenta la resistividad del terreno para diferentes condiciones de cortocircuito. Para ello se realizó una búsqueda de información relacionada con el tema y se ejecutó el diseño de las mallas con el empleo del programa PAST. Como resultados se comprobó que los proyectos típicos propuestos por la Unión Eléctrica de mallas de sistemas de puesta a tierra de subestaciones de 34.5/13.2 kV de 6, 2 y 1 poste incumplen las especificaciones de los proyectos ya que superan considerablemente los valores permisibles y normados, además de demostrarse que las mallas diseñadas con la ayuda del programa PAST cumplen con los niveles permisibles de tensión de contacto y de paso, no así con la resistencia de puesta a tierra, esto último causado por la reducidas dimensiones de dichas subestaciones.

TABLA DE CONTENIDOS

<i>PENSAMIENTO</i>	i
<i>DEDICATORIA</i>	ii
<i>AGRADECIMIENTOS</i>	iv
TAREA TÉCNICA	vi
RESUMEN	vii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. Estudio y análisis crítico de la bibliografía disponible relacionada con el proyecto de sistemas de puesta a tierra.	4
1.1 Sistemas de Puesta a Tierra.	4
1.1.1 Clasificación de la puesta a tierra.	4
1.1.2 Mallas de puesta a tierra.	5
1.1.3 Elementos de un sistema de puesta a tierra.	5
1.1.3.1 Electrodo de puesta a tierra.	6
1.1.3.2 Barrajes o conductores equipotenciales.	6
1.1.3.3 Conductores de enlace	6
1.1.3.4 Puentes de conexión equipotencial	7
1.1.3.5 Conectores y/o soldaduras	7
1.1.4 Objetivos de una malla puesta a tierra.	8

1.2	Requisitos de una malla de puesta a tierra.....	8
1.2.1	Requisitos de proyecto.	9
1.2.2	Requisitos de diseño.....	10
1.2.3	Diseño de una Malla de puesta a Tierra.	11

CAPÍTULO 2. Evaluación de los diferentes proyectos de sistemas de puesta a tierra típicas propuesto por la unión eléctrica para subestaciones de 34.5/13.2 KV.

22

2.1	Características de las instalaciones.	22
2.1.1	Malla de Subestación de 6 postes de 34.5/13.2 kV.....	22
2.1.2	Malla de Subestación de 2 postes de 34.5/13.2 kV.....	24
2.1.3	Malla de Subestación de 1 poste de 34.5/13.2 kV.....	26
2.2	Análisis de las tensiones de paso y contacto.	28
2.2.1	Malla de Subestación de 6 postes de 34.5/13.2 kV.....	28
2.2.2	Malla de Subestación de 2 postes de 34.5/13.2 kV.....	29
2.2.3	Malla de Subestación de 1 postes de 34.5/13.2 kV.....	30
2.3	Análisis de la resistencia de puesta a tierra.	32
2.3.1	Malla de Subestación de 6 postes de 34.5/13.2 kV.....	32
2.3.2	Malla de Subestación de 2 postes de 34.5/13.2 kV.....	33
2.3.3	Malla de Subestación de 1 postes de 34.5/13.2 kV.....	34

CAPÍTULO 3. Determinación de la posibilidad de desarrollar proyectos típicos de sistemas de puesta a tierra de Subestaciones de 34.5/13.2 kV que tengan en cuenta la resistividad del terreno y las condiciones de cortocircuito.....

3.1	Características de las mallas diseñadas con el programa PAST.....	35
3.1.1	Malla de Subestación de 6 postes de 34.5/13.2 kV.....	35
3.1.2	Mallas de Subestaciones de 1 y 2 postes de 34.5/13.2 kV.....	36

3.2	Análisis de las tensiones de paso y contacto de las mallas propuestas. ...	37
3.2.1	Malla de Subestación de 6 postes de 34.5/13.2 kV.....	37
3.2.2	Mallas de Subestaciones de 1 y 2 postes de 34.5/13.2 kV.....	37
3.3	Análisis de las tensiones de contacto teniendo en cuenta la resistividad del terreno para diferentes corrientes de cortocircuitos.....	38
3.3.1	Malla para una subestación de 6 postes de 34.5/13.2 kV.....	39
3.3.2	Malla para las subestaciones de 1 y 2 postes de 34.5/13.2 kV.....	41
3.4	Análisis de la resistencia de puesta a tierra.	44
3.4.1	Malla para una subestación de 6 postes de 34.5/13.2 kV.....	45
3.4.2	Malla para las subestaciones de 1 y 2 postes de 34.5/13.2 kV.	46
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		49

INTRODUCCIÓN

Un elemento fundamental dentro de los sistemas eléctricos de transmisión, y hoy día dentro de todo sistema eléctrico seguro, es el sistema de puesta a tierra.

Ya para el año 1923 en Francia, debido a que se conocían los riesgos de electrificación en los seres humanos, sobre todo con la corriente alterna, se impone una norma relativa a la puesta a tierra. Esta norma no daba ninguna indicación sobre las condiciones de la puesta a tierra ni sobre el valor de la resistencia de toma de tierra. En general se trataba de condiciones de instalación [1].

Actualmente se tiene plena conciencia de los efectos del paso de una corriente eléctrica por el cuerpo humano y la importancia de la puesta a tierra de los sistemas eléctricos para salvaguardar la vida así como también los bienes materiales. Según el proyecto en el cual se debe diseñar el sistema de puesta a tierra se tienen diferentes consideraciones, las cuales varían, sobre todo, en las magnitudes de los requerimientos de la resistividad del terreno, las tensiones de contacto y de paso y la resistencia de puesta a tierra. En el diseño de malla de puesta a tierra para subestaciones eléctricas, una de las principales preocupaciones con que se encuentra el diseñador, es comprobar en campo que el diseño presentado para su construcción cumpla realmente con las condiciones mínimas de protección y seguridad exigidas [2].

El objetivo principal de las mallas de tierra en subestaciones es el de garantizar protección al personal durante fallas eléctricas, aunque también sirven como medio de disipación de corrientes dentro de la tierra de tal forma que no excedan los límites operativos de los equipos. Existen demasiados parámetros que afectan

las tensiones alrededor del área de la subestación, los cuales son dependientes del sitio de instalación, por lo cual es imposible diseñar una malla que pueda ser aceptada en cualquier lugar, dado que tanto la magnitud de la corriente a disipar, la duración de la falla, la resistividad del terreno, el material superficial, así como el tamaño y forma de la malla tienen gran influencia sobre las tensiones que aparecen. La Unión Eléctrica (UNE) tiene como práctica común proponer proyectos de puesta a tierra típicos, que se ejecutan sin tener en cuenta las características reales de las subestaciones que se proyectan, fundamentalmente en cuanto a resistividad del terreno y condiciones de cortocircuito, en este trabajo diploma se le dará solución a este problema.

Hipótesis:

Las subestaciones de 34.5/13.2 kV se caracterizan por disponer de un área relativamente pequeña donde resulta prácticamente imposible cumplir con los requerimientos de resistencia y tensiones de contacto tolerables. La UNE propone proyectos típicos que deben ser evaluados y en caso de que no cumplan con lo planteado tratar de hacer propuestas con mayor fundamento científico-técnico.

Dentro de este contexto, se pretende con el presente trabajo de investigación, cumplir con los siguientes objetivos:

Objetivo:

Evaluar los proyectos típicos de mallas de tierra que actualmente propone la UNE en subestaciones de 34.5/13.2 kV y la determinación de la posibilidad de diseñar mallas de tierra típicas con un mejor comportamiento que las propuestas.

Objetivos específicos:

1. Realizar una búsqueda bibliográfica sobre el proyecto de sistemas de puesta.
2. Evaluar las características de los diferentes proyectos típicos que propone la UNE para las subestaciones de 34.5/13.2 kV.

3. Proyectar mallas de tierra de subestaciones de 34.5/13.2 kV para diferentes condiciones de resistividad del terreno y corrientes de cortocircuito.

Organización del informe

El trabajo de diploma incluye una introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones y referencias bibliográficas. Los tres capítulos se resumen como sigue:

Capítulo 1. Estudio y análisis crítico de la bibliográfica disponible y relacionada con el proyecto de sistemas de puesta a tierra.

Capítulo 2. Evaluación de los diferentes proyectos de sistemas de puesta a tierra típicos propuestos por la Unión Eléctrica para subestaciones de 34.5/13.2 kV.

Capítulo 3. Determinar la posibilidad de desarrollar proyectos típicos de sistemas de puesta a tierra de subestaciones de 34.5/13.2 kV que tengan en cuenta la resistividad del terreno y las condiciones de cortocircuito.

CAPÍTULO 1. Estudio y análisis crítico de la bibliografía disponible relacionada con el proyecto de sistemas de puesta a tierra.

1.1 Sistemas de Puesta a Tierra.

1.1.1 Clasificación de la puesta a tierra.

La tierra de servicio: En los trabajos de reparación y mantenimiento de muchas instalaciones es necesario conectar a tierra temporalmente las partes normalmente energizadas a fin de evitar accidentes debido a la reconexión indebida de la misma o a las tensiones inducidas por sistemas energizados cercanos [3] [4].

La tierra de protección: Es la que conecta conductivamente los elementos metálicos expuestos de una instalación, aquellos elementos conductores, normalmente sin tensión (carcasas, tuberías, crucetas, etc.) pero que pueden eventualmente adquirir un potencial respecto tierra al producirse una falla en la instalación [3] [4].

La tierra de operación o funcionamiento: Para el correcto funcionamiento de los sistemas eléctricos y de algunas de sus componentes es necesario en muchas ocasiones establecer una conexión a tierra en determinados puntos. Ejemplos de este tipo de puesta a tierra son la conexión a tierra del neutro de los generadores y de los transformadores conectados en estrella, la conexión a tierra de los pararrayos, cables protectores, supresores de sobretensión en instalaciones de bajo voltaje, etc. [3] [4].

Es común usar la misma malla de tierra de una subestación tanto como malla de servicio como malla de protección. En la medida que se cumplan las condiciones de seguridad esto no es problema. No está permitido conectar a la misma malla sistemas de tensiones diferentes.

1.1.2 Mallas de puesta a tierra.

En la bibliografía consultada para realizar este trabajo se encontraron dos definiciones de puesta a tierra, las cuales se mencionan a continuación:

“Un conjunto de uno o más electrodos metálicos desnudos, enterrados en el terreno e interconectados eléctricamente entre sí, cuyo objetivo principal es proporcionar un contacto eléctrico conductivo entre tierra y otros elementos metálicos que se encuentran en una instalación sobre el terreno o en el mismo terreno” [5].

Otras de las definiciones de puesta a tierra es la que da el reglamento eléctrico de baja tensión (REBT) que no es más que:

“La denominación de puesta a tierra comprende toda la ligazón metálica directa, sin fusible ni protección alguna, de sección suficiente, entre determinados elementos o partes de una instalación y un electrodo o grupo de electrodos enterrados en el suelo, con objetivo de conseguir que en el conjunto de instalaciones, edificios y superficie próxima del terreno no existan diferencias de potencial peligrosas y que al mismo tiempo, permita el paso a tierra de las corrientes de falla o de las descargas de origen atmosférico”.

1.1.3 Elementos de un sistema de puesta a tierra.

- Electrodo de puesta a tierra.
- Barrajes o conductores equipotenciales.
- Conductores de enlace.
- Puentes de conexión equipotencial.
- Conectores y/o soldaduras.

1.1.3.1 Electrodo de puesta a tierra.

Los electrodos son elementos metálicos que permanecen en contacto directo con el terreno. Estos estarán contruidos con materiales inalterables a la humedad y a la acción química del terreno. Por ello, se suelen usar materiales tales como el cobre, el acero galvanizado y el hierro cincado.

1.1.3.2 Barrajes o conductores equipotenciales

Los barrajes o conductores equipotenciales consisten en barras de sección rectangular o conductores cilíndricos dimensionados para permitir el agrupamiento en un punto de múltiples conexiones. Para instalaciones eléctricas los equipos y áreas que deben poseer barrajes se relacionan a continuación:

- El equipo de acometida.
- Los centros de control de motores.
- Las subestaciones.
- Las salas de equipos eléctricos
- Las salas de equipos de telecomunicaciones
- Los cuartos eléctricos
- Los cuartos de telecomunicaciones.

1.1.3.3 Conductores de enlace

Constituyen la manera de transmitir a cualquier lugar o equipo de la instalación el potencial de seguridad y referencia existente en la tierra física o suelo. Estos a su vez se dividen en:

- El conductor del electrodo de puesta a tierra
- El conductor de puesta a tierra del sistema
- Los conductores de puesta a tierra de equipos

El conductor del electrodo de puesta a tierra es el conductor utilizado para enlazar el electrodo de puesta a tierra con el conductor de puesta a tierra del sistema a través del primer barraje equipotencial asociado a la instalación.

Los conductores de puesta a tierra de equipos. Todos los equipos, componentes, por razones de seguridad requieran conexión a tierra deben ser conectados al barraje equipotencial asociado al equipo o área correspondiente

1.1.3.4 Puentes de conexión equipotencial

Los puentes de conexión equipotencial de equipos consisten en conductores o uniones, con resistencia eléctrica mínima, entre dos o más partes del conductor de puesta a tierra de equipo. Están constituidos por conductores o uniones que ofrecen una conducción eléctrica con mínima resistencia eléctrica para asegurar la continuidad eléctrica necesaria entre las partes metálicas que deben estar eléctricamente conectadas entre sí (**Figura 1.1**).

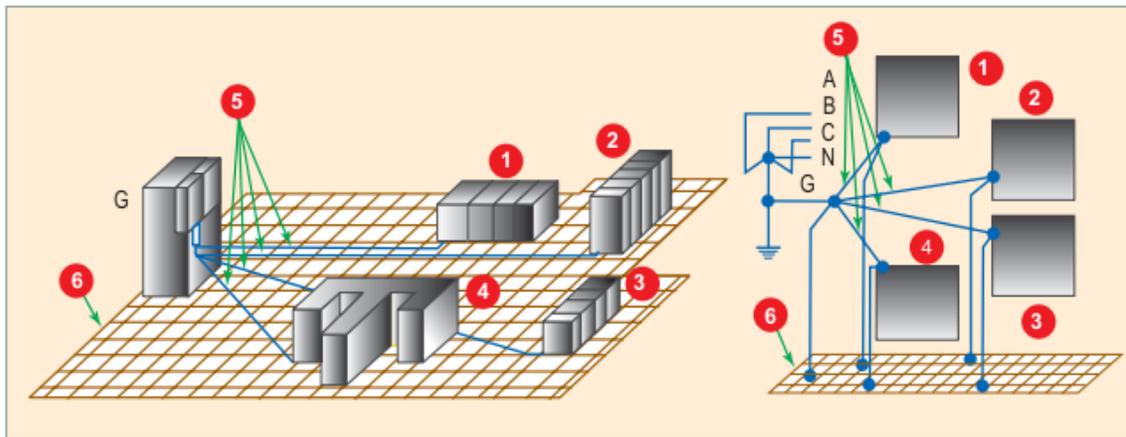


Figura 1.1 Conexión Equipotencial (1, 2, 3, 4: carcavas o estructuras metálicas; 5: conductores de conexión equipotencial; 6: malla de tierra)

1.1.3.5 Conectores y/o soldaduras

Consisten en conectores mecánicos o soldaduras entre los electrodos de puesta a tierra con el conductor del electrodo de puesta a tierra, los conductores de puesta

a tierra y los barrajes equipotenciales para ofrecer una resistencia eléctrica mínima. Además de ser resistente a las condiciones ambientales. Todo encaminado a lograr óptimas condiciones de seguridad y estabilidad. [6] [7] [8] [9] [10]

1.1.4 Objetivos de una malla puesta a tierra.

Los objetivos fundamentales de una malla de tierra son [11]:

- Brindar seguridad y protección a los seres humanos.
- Establecer la permanencia de un potencial de referencia, al estabilizar la tensión eléctrica a tierra, bajo condiciones normales de operación.
- Evitar tensiones peligrosas entre estructuras, equipos y el terreno durante cortocircuitos a tierra o en condiciones normales de operación.
- Evitar descargas eléctricas peligrosas en las personas, durante condiciones normales de funcionamiento.
- Proporcionar un camino a tierra para las corrientes inducidas. Este camino debe ser lo más corto posible.
- Dispersar las cargas estáticas a tierra.

1.2 Requisitos de una malla de puesta a tierra.

Considerando los objetivos de una puesta a tierra, se debe requerir de determinadas características y requisitos. Estos requerimientos se dividen en dos categorías [11]:

- ❖ **Requisitos de proyecto**, que establecen las características generales de la puesta a tierra, para que cumpla con los objetivos fundamentales perseguidos.
- ❖ **Requisitos de diseño**, esto es, características que deben poseer los constituyentes de la puesta a tierra, para que sea efectiva, duradera, soporte las sollicitaciones máximas (mecánicas y eléctricas) a que pueden ser sometidas, etc.

1.2.1 Requisitos de proyecto.

Los requisitos normales de proyecto de una puesta a tierra o sistema de puesta a tierra, son:

- La puesta a tierra o sistema de puesta a tierra deberá tener, como máximo, un determinado valor de resistencia establecido.
- La puesta a tierra deberá abarcar un área tal que integre todos los elementos de la instalación que puedan adquirir potenciales peligrosos al ocurrir la falla. Además, los elementos de la puesta a tierra deben estar dispuestos de manera que se cumpla con los requerimientos de seguridad para las personas que trabajan o transitan en su interior o contorno.
- Deben tenerse en cuenta los posibles riesgos que pueden presentarse para los equipos instalados en el interior y exterior de la instalación protegida, y realizar las acciones necesarias para disminuir estos riesgos de daño a un mínimo, considerando aspectos de costo/beneficio.
- Las normas nacionales e internacionales establecen los niveles de resistencia de puesta a tierra para cada instalación e incluso fabricantes de equipos eléctricos y electrónicos que requieren de conexión a tierra para su funcionamiento, establecen los niveles de resistencia de puesta a tierra que garantizan el correcto funcionamiento de su equipo. Por ejemplo:
 - Hay normas que establecen el límite de resistencia de puesta a tierra de redes de computadora, de menos de 1 Ω , otras en menos de 2 Ω .
 - Para instalaciones industriales y de servicio de entre 1 y 5 Ω .
 - Para subestaciones grandes entre 1 y 3 Ω , para subestaciones de distribución entre 1 y 5 Ω y para bancos de transformadores menos de 10 Ω .
 - Para estructuras de transmisión entre 10 y 30 Ω , según el voltaje y la resistividad del terreno.

1.2.2 Requisitos de diseño.

Los requisitos de diseño de una puesta a tierra dependen de las características particulares de ésta y de las condiciones del medio en la que se encuentra. Los requisitos normalmente considerados son:

- Los diferentes elementos constituyentes de la puesta a tierra deberán poder conducir las corrientes máximas que eventualmente pueden circular por ellos, durante el, posible máximo tiempo, sin exceder la temperatura máxima permisible. Esta temperatura depende del material de la puesta a tierra y del tipo de unión usados entre sus partes. Este requerimiento es aplicable tanto a los elementos (electrodos) que forman la puesta a tierra propiamente tal, como a los elementos de unión entre la puesta a tierra, los equipos y estructuras (cables de unión, conectores etc.).
- Los elementos de una puesta a tierra deberán soportar sin deterioro, los esfuerzos mecánicos a que puedan quedar sometidos durante las faenas de construcción de ésta u otras faenas contemporáneas.
- El material empleado en la construcción de la puesta a tierra deberá ser resistente a eventuales ataques corrosivos del terreno y atmósfera.
- No se usaran en la puesta a tierra, materiales que puedan producir corrosión galvánica de importancia en otros elementos metálicos enterrados. Ejemplo de elementos que pueden ser afectados son tuberías de diferente uso, bases de estructuras, anclajes de estructuras de líneas atirantadas, etc.
- Se deberán sobredimensionar y proteger los conductores de conexión a la puesta a tierra en aquellos casos en que el calentamiento normalmente aceptado en otras circunstancias, pudiera dar lugar a incendios debido a la presencia de materiales de fácil combustión o inflamables.
- En zonas de emanaciones gaseosas inflamables, deberán recurrirse a métodos adecuados para evitar en su casi totalidad, posibles arcos eléctricos entre partes metálicas o entre partes metálicas y el terreno.

1.2.3 Diseño de una Malla de puesta a Tierra.

El diseño de una malla a tierra está afectado por las siguientes variables:

- ❖ Tensión Permisible de Paso.
- ❖ Tensión Permisible de contacto.
- ❖ Configuración de la malla.
- ❖ Resistividad del terreno.
- ❖ Tiempo máximo de despeje de la falla.
- ❖ Conductor de la malla.
- ❖ Profundidad de instalación de la malla.

1.3 Definiciones.

Es conveniente definir algunos términos usados frecuentemente para referirse al proyecto y análisis de puestas a tierra, y que algunas de ellas se utilizan en este trabajo. Se ha tratado que estas definiciones no se aparten de las habituales utilizadas en la literatura correspondiente y en las normas más conocidas e importantes. Se ha preferido indicar las definiciones en un orden lógico y no alfabético [12] [7] [5] [13] [14].

Tierra.

Es la masa conductiva del terreno como un todo.

Puesta a Tierra.

Es un conjunto de uno o más electrodos metálicos desnudos, enterrados en el terreno e interconectados eléctricamente entre sí, cuyo objetivo principal es proporcionar un contacto eléctrico conductivo entre tierra y otros elementos metálicos que se encuentran en una instalación sobre el terreno o en el terreno mismo.

Poner a tierra.

Es una acción intencional, mediante la cual elementos activos del sistema de transmisión, por ejemplo neutros de transformadores de potencia, se conectan a una puesta a tierra (puesta a tierra de servicio), de manera de establecer, en forma sólida, la tierra como potencial de referencia.

Conectar a tierra.

Es una acción física, de carácter particular, realizada mediante conductores y conectores para unir un determinado elemento metálico con la puesta a tierra correspondiente. El objetivo es establecer un potencial similar en todos estos elementos.

Tierra remota o de referencia.

Es una zona del terreno, suficientemente distante de una puesta a tierra, tal que su potencial no varíe ante variaciones de la corriente dispersa por una puesta a tierra o sistema de puesta a tierra.

Electrodo vertical.

Es el constituyente más simple de una puesta a tierra destinado a proporcionar un contacto con tierra. Esta es la forma más común de electrodos, cuando no se requiere controlar los potenciales de superficie. Su costo de instalación es relativamente bajo y pueden usarse para alcanzar en profundidad, capas de terreno de baja resistividad (**Figura 1.2**).

La barra es de cobre puro o de acero recubierto de cobre. El tipo recubierto se usa cuando la barra se entierra por medios mecánicos (impacto) ya que el acero empleado tiene alta resistencia mecánica. La capa de cobre debe ser de alta pureza y aplicada electrolíticamente para que no se deslice al enterrar la barra. Las barras están disponibles en diámetros de 15 mm a 20 mm (cobre sólido) y 9,5 a 20 mm (acero recubierto de cobre) y longitudes de 1,2 a 3 metros. Para barras más largas se emplea un martillo neumático

Cuando se requiere barras más profundas o en condiciones de suelo difícil donde hay roca subyacente, la forma más efectiva es taladrar una perforación estrecha

en la cual se instala el electrodo de barra con material de relleno adecuado. De este modo incluso puede instalarse electrodos de cobre sólido relativamente delgados [15] (**Figura 1.3**).

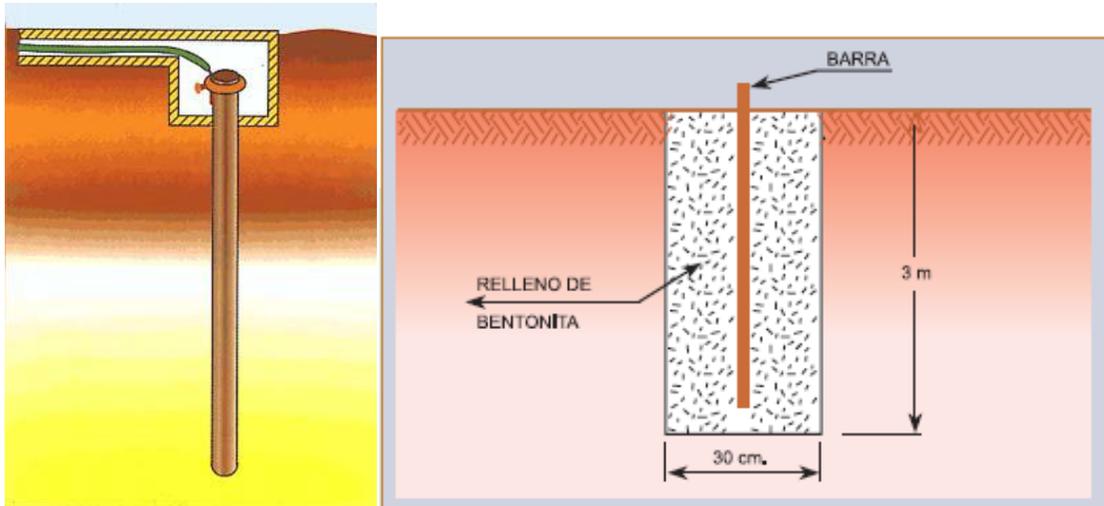


Figura 1.2 Electrodo vertical [5]. **Figura 1.3** Perforación con electrodo vertical [15].

Electrodos horizontales.

Pueden ser instalados en surcos directamente en el terreno o más frecuentemente en zanjales de hasta un metro de profundidad. Lo habitual es entre 60 - 80 centímetros y más si es necesario pasar bajo nivel de cultivo o de escarcha, en zonas heladas.

Una buena oportunidad de instalación es tender el conductor durante las excavaciones para obras civiles, previniendo daño o robo del conductor, una vez tendido [15] (**Figura 1.4**).

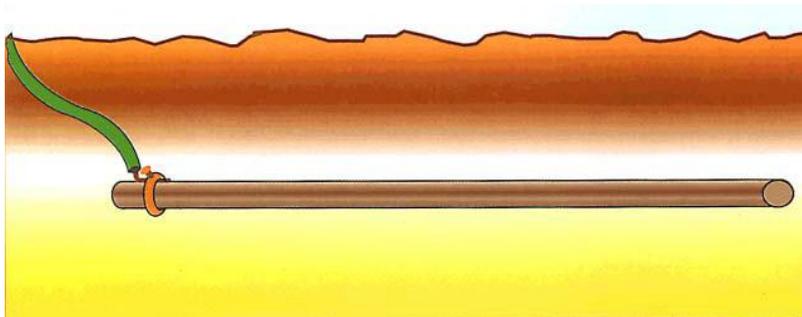


Figura 1.4 Electrodo horizontal

Conexiones.

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 la duración y el valor de corriente de falla que se espera que soporte el sistema de tierra. Los métodos de unión empleados incluyen métodos mecánicos, soldadura en fuerte (bronceado), soldadura exotérmica y soldadura por fusión autógena [15] (**Figuras 1.5 y 1.6**).

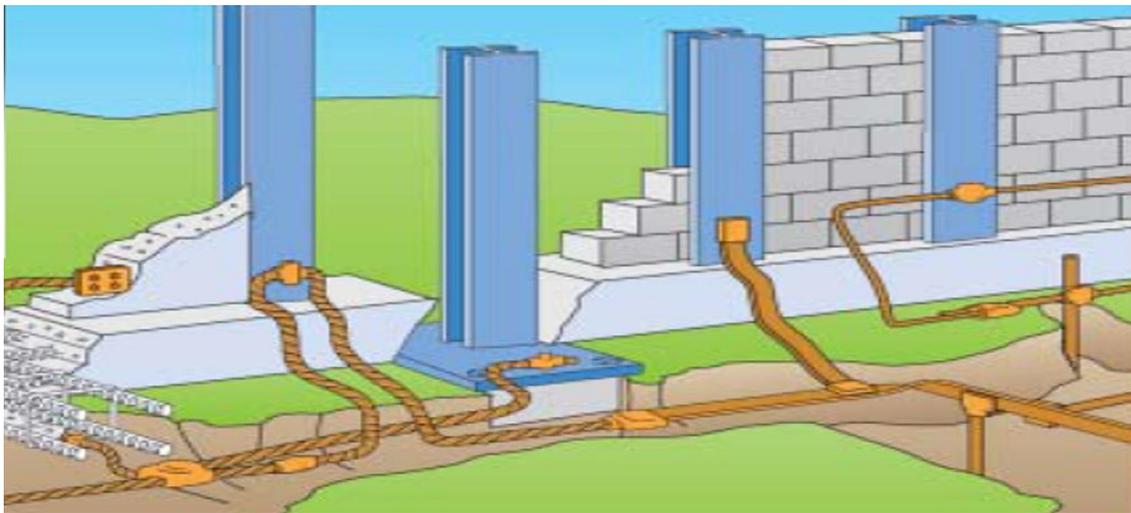


Figura 1.5 Métodos de unión empleados.

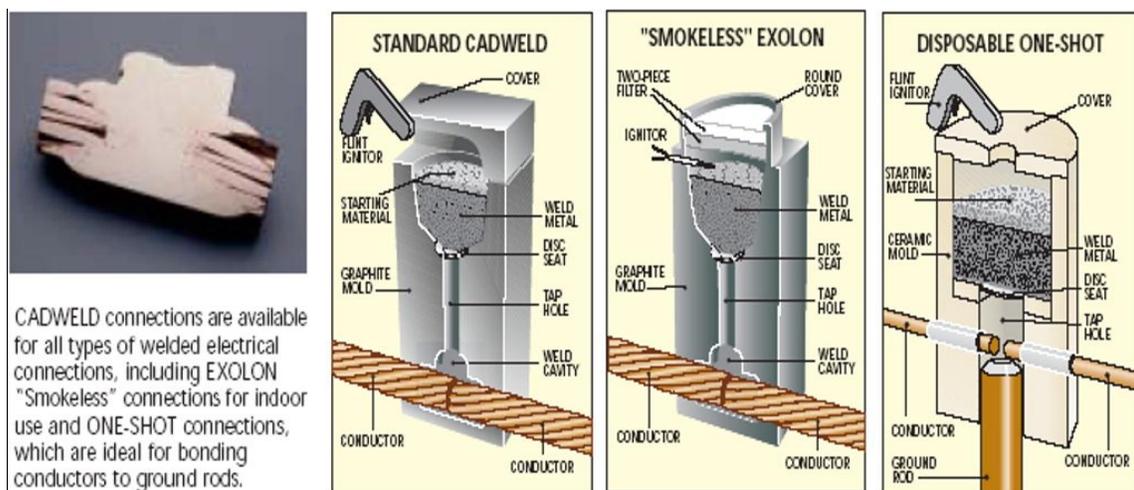


Figura 1.6 Soldadura exotérmica

Malla de tierra

Es una puesta a tierra común a todos los elementos metálicos y circuitos de una instalación o parte claramente definida de la instalación. Tiene como objetivo el poseer un adecuado valor de resistencia y además controlar las solicitaciones de voltaje a que pueden quedar sometidas las personas, en el interior y contorno del área abarcada por ella. Generalmente consiste en un reticulado de conductores interconectados y enterrados a cierta profundidad. La malla de tierra puede estar unida con otras puestas a tierra, mallas de tierra o electrodos auxiliares, para mejorar sus características y las del conjunto (**Figura 1.7**).

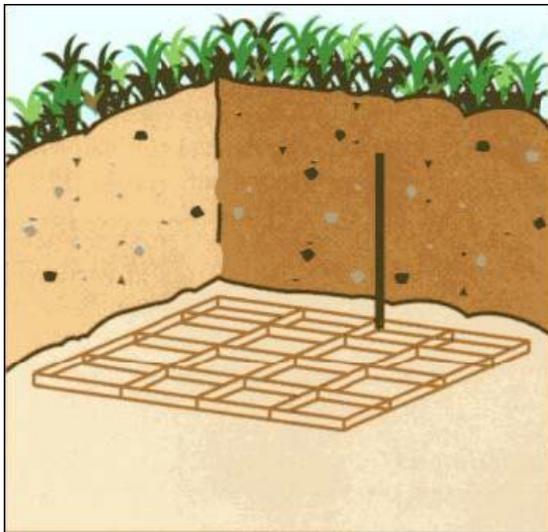


Figura 1.7 Malla de tierra

Resistencia a tierra.

Es la resistencia existente entre un punto cualquiera de una puesta a tierra y la tierra remota. Sea define como el cociente entre el potencial eléctrico que adquiere una puesta a tierra y la corriente dispersada por ésta.

Tensión de paso.

Diferencia de tensiones en la superficie aplicada sobre una persona que presenta una distancia entre pies de un metro sin estar en contacto con ningún objeto conectado a la malla [14] (**Figura 1.8**).

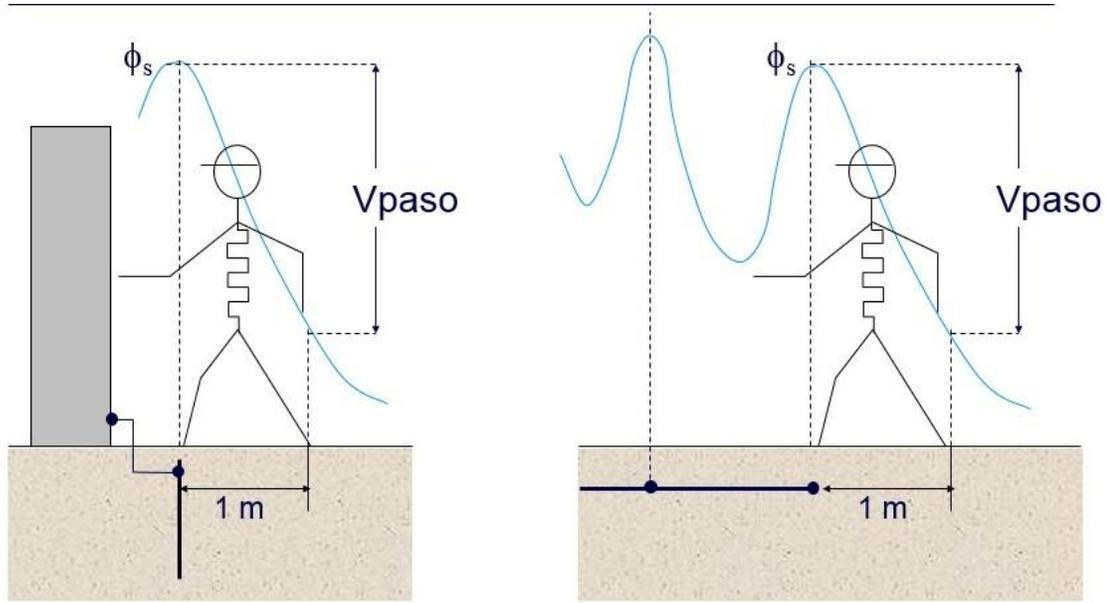


Figura 1.8 Tensión de paso.

Su valor permisible está dada por la siguiente expresión:

$$E_p = \frac{165 + \rho_s}{\sqrt{t}}$$

Donde:

E_p = Tensión de Paso Permisible en voltios.

ρ_s = Resistividad de la superficie del terreno en (Ω -m)

t = Duración máxima de falla en segundos.

Tensión de contacto.

Diferencia de tensión entre la malla de tierra (GPR) y el potencial de la superficie donde la persona está parada mientras simultáneamente tiene una mano en contacto con una estructura conectada a la malla [14] (**Figura 1.9**).

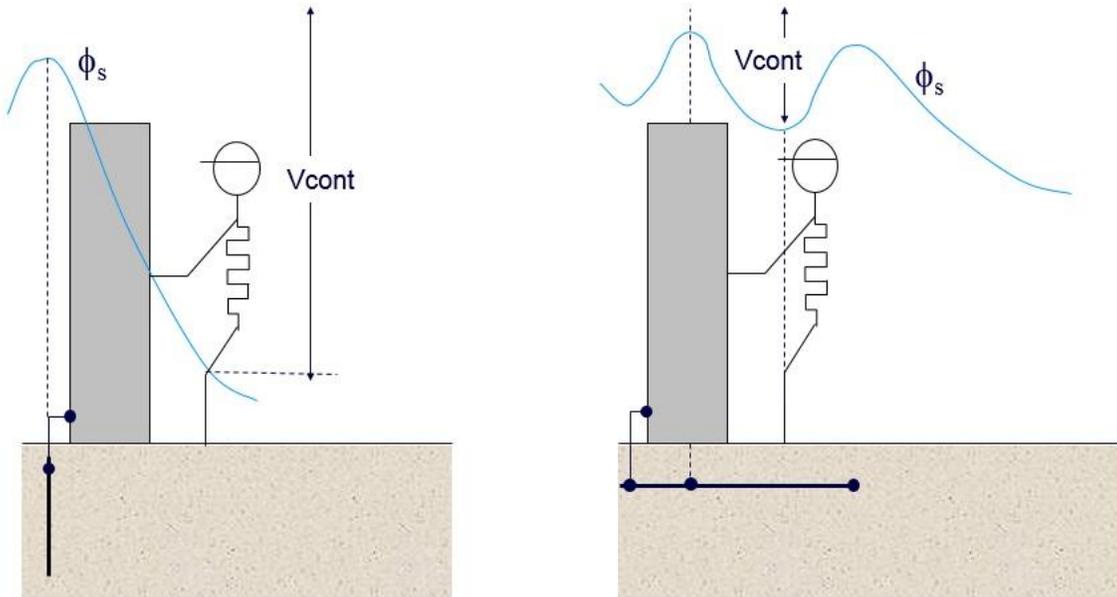


Figura 1.9 Tensión de contacto.

Su valor permisible está dado por la siguiente expresión:

$$E_t = \frac{165 + 0.25\rho_s}{\sqrt{t}}$$

Donde:

E_t = Tensión de contacto permisible en voltios.

ρ_s = Resistividad de la superficie del terreno en (Ω -m)

t = Duración máxima de falla en segundos.

Resistividad del terreno.

La resistividad eléctrica del suelo describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. El suelo es una mezcla de roca, gases, agua y otros minerales orgánicos e inorgánicos. Esta mezcla hace que la resistividad del terreno aparte de depender de su composición interna, dependa de otros factores externos como

son la temperatura, la humedad, el contenido de sales, etc., que pueden provocar que el mismo suelo presente resistividades diferente con el tiempo.

Tiempo de duración de la falla.

El tiempo durante el cual una persona o equipo pueden quedar eventualmente sometidos a una sollicitación eléctrica en una instalación de alta tensión, es el tiempo que perdura la condición anormal o de falla que provoca la circulación de corrientes residuales por el terreno. Este tiempo de duración de la falla depende en gran medida de la prontitud con que actúan las protecciones de los componentes del sistema generación/transmisión.

Reconexiones contra falla.

Es común que las líneas de transmisión y distribución dispongan de elementos de control que reconectan automáticamente estas, después de ser abiertas por la ocurrencia de una falla que puede ser de carácter transitorio (rayo, rama llevada por el viento, etc.). En las líneas de transmisión se suele realizar una sola reconexión automática, después de ser despejada una falla. En sistemas de distribución se utilizan de 1 a 4 reconexiones, que se realizan 0.1 a 0.5 s después de despejada la falla; si la falla persiste, la línea se desconecta definitivamente. En la situación descrita, si una persona ha quedado sometida a una sollicitación peligrosa en el primer instante de ocurrida una falla, es probable que continúe en esas condiciones de riesgo durante las siguientes fallas provocadas por las reconexiones. Hasta la fecha, no existen antecedentes concretos que descarten un posible efecto acumulativo de varias sollicitaciones consecutivas con tiempos relativamente cortos entre ellas. Por tanto, es recomendable considerar como tiempo total de la sollicitación, la suma de los tiempos parciales de duración de cada falla.

Corriente permisible por el cuerpo humano.

Los efectos del paso de la corriente eléctrica a través de las partes vitales del cuerpo humano dependen de la duración, la magnitud, y frecuencia de esta corriente. La consecuencia más peligrosa a tal exposición es el corazón,

condición conocida como la fibrilación ventricular, produciendo esto el paro inmediato de la circulación de la sangre y por consiguiente sus efectos letales.

Efecto de la frecuencia

Los humanos están muy vulnerables a los efectos de la corriente eléctrica en las frecuencias de 50 Hz o 60 Hz. Corrientes de aproximadamente 0.1 A pueden ser letales. La investigación indica que el cuerpo humano puede tolerar a 25Hz corrientes ligeramente superiores y aproximadamente cinco veces superior a la corriente directa. A frecuencias de 3000-10 000 Hz, pueden tolerarse corrientes incluso superiores (Dalziel y Mansfield [B33]; Dalziel Ogden, y Abbott [B36]). En algunos casos el cuerpo humano puede tolerar corrientes muy altas producidas por olas de relámpago. La Comisión Internacional Electrotécnica mantiene curvas de corrientes tolerables por el cuerpo humano como una función de frecuencia y corrientes de descargas capacitivas [IEC 60479-2 (1987-03) [B83]]. Otros estudios de los efectos de los impulsos de corrientes directas y oscilatorias se informan en Dalziel [B25] [B27].

Efecto de la magnitud y duración

Los efectos fisiológicos más comunes de corriente eléctrica en el cuerpo, declarado en el orden creciente de magnitud, está el umbral de percepción, contracción muscular, la inconsciencia, la fibrilación del corazón, el bloqueo del nervio respiratorio, y quemando (Geddes y Panadero [B74]; IEC 60479-1 (1994-09) [B82]).

Corrientes de 1 mA se reconoce generalmente como el umbral de percepción; es decir, la magnitud actual en que una persona simplemente descubre una sensación de hormigueo ligera en sus manos o yemas de los dedos causada por la corriente de paso (Dalziel [B27]).

Las corrientes de 1-6 mA, a menudo se denominan corrientes permitidas, aunque es desagradable sostenerlas, generalmente no daña la habilidad de una persona que sostiene un objeto electrizado para controlar sus músculos y soltarlo. El experimento clásico de Dalziel con 28 mujeres y 134 hombres proporcionan datos que indican un promedio de corrientes permitidas de 10.5 mA para las mujeres y

16 mA para los hombres, y valores de 6 mA y 9 mA como el umbral respectivo (Dalziel y Massogilia [B34]).

En el rango de 9-25 mA, las corrientes pueden ser dolorosas y pueden hacerlo difícil o imposible de soltar objetos energizados asidos por la mano. Las corrientes más altas provocan contracciones musculares que todavía podrían hacer difícil la respiración. Estos efectos no son permanentes y desaparecen cuando la corriente se interrumpe, a menos que la contracción es muy severa y la respiración se detiene durante minutos en lugar de segundos. Todavía incluso casos así que responden a menudo a la resucitación.

(Dalziel [B29]).

No es hasta las magnitudes en el rango de 60-100 mA que se alcanza la fibrilación ventricular, la parada del corazón, o la inhibición de respiración que podría causar lesión o muerte. Una persona entrenada en la resucitación cardiopulmonar (CPR) debe administrar CPR hasta que la víctima pueda tratarse en una entidad médica (Dalziel [B30]; Dalziel y Lee [B31]).

Es mostrado por Dalziel y otros (Dalziel, Lagen, y Thurston [B35]; Dalziel y Massogilia [B34]), que la magnitud de corriente que no provoca fibrilación (I_B) a duraciones que van de 0.03-3.0 s se relaciona a la energía absorbida por el cuerpo, esto se describe en la ecuación siguiente:

$$S_B = I_B^2 \times t_s$$

Donde:

I_B = es la magnitud del rms de la corriente a través del cuerpo en A.

t_s = es la duración de la exposición actual en s.

S_B = es la constante empírica relacionada a la energía del choque eléctrico tolerada por un cierto por ciento de una población dada.

Tensión de contacto Tolerable.

Es la máxima diferencia de potencial que puede experimentar una persona en contacto con un equipo aterrado, en el momento de ocurrir una falla. La distancia máxima para tocar un equipo supone que es máximo alcance horizontal, la cual se asume a un (1) metro [2].

Tensión de Paso Tolerable

Es la máxima diferencia de potencial que puede experimentar una persona caminando en la superficie de la subestación en sus alrededores al momento de ocurrir una falla, esta diferencia de potencial se toma entre dos puntos separados a una distancia de un (1) metro [2].

CAPÍTULO 2. Evaluación de los diferentes proyectos de sistemas de puesta a tierra típicas propuesto por la Unión Eléctrica para subestaciones de 34.5/13.2 KV.

En el siguiente capítulo se abordará sobre los proyectos de mallas de sistemas de puesta a tierra propuestos por la Unión Eléctrica, teniendo en cuenta las características de las Subestaciones de 6 postes, 2 postes y 1 poste de 34.5/13.2 kV, estas subestaciones son las que con más frecuencia se construyen en más cantidad sin tener en cuenta sus parámetros, haciendo de estas mallas una peligrosa estructura para los que dan mantenimiento en la instalación o a personas curiosas que se acercan a la misma, también se hará un análisis de las tensiones de paso, de contacto y de las resistencias de puesta a tierra.

2.1 Características de las instalaciones.

2.1.1 Malla de Subestación de 6 postes de 34.5/13.2 kV.

La malla del sistema de puesta a tierra de la Subestación de 6 postes de 34.5/13.2 kV está formado por un reticulado de 28.0 m de lado mayor y 12.0 m de lado menor para un área de la malla de 336.0 m² como se muestra en la figura 2.3 que fue modelado por el programa PAST. Para este reticulado se utilizó 100 m de cable trenzado de cobre electrolítico desnudo de sección 4/0 AWG (107.15 mm² y 11.68 mm de diámetro exterior, cable horizontal), a una profundidad de 0.5 m con respecto al nivel del terreno se conectaron 16 electrodos verticales a lo largo y dentro del perímetro de la malla con un diámetro de 0.02 m y 3 m de longitud cada uno. Los electrodos tanto verticales como horizontales son unidos por soldaduras

exotérmicas. En la figura 2.1 y 2.2 se muestra el modelo del proyecto propuesto por la Unión Eléctrica de la configuración de los electrodos y de la subestación.

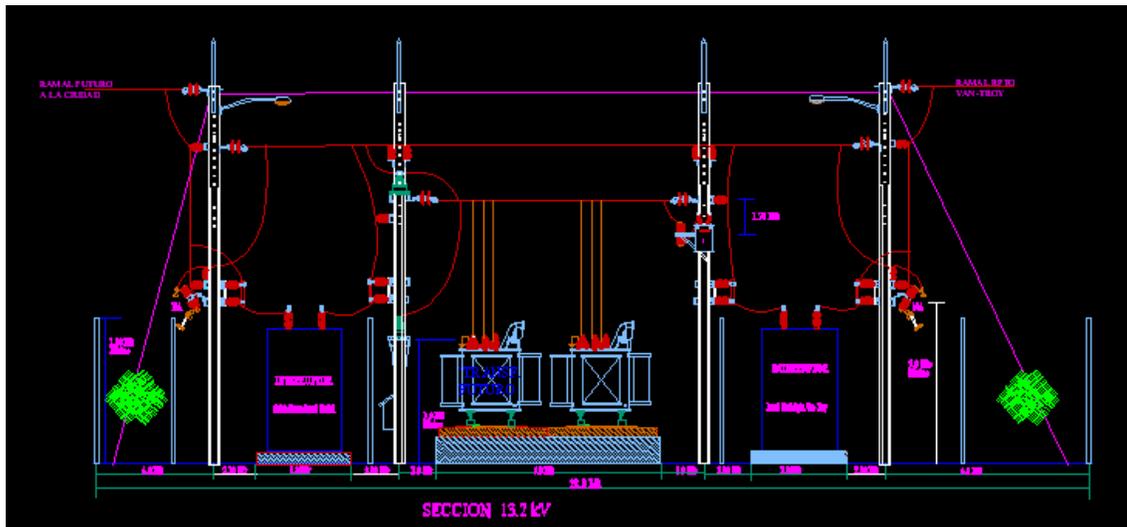


Figura 2.1 Modelo de la Subestación de 6 postes de 34.5/13.2 kV, proyecto UNE.

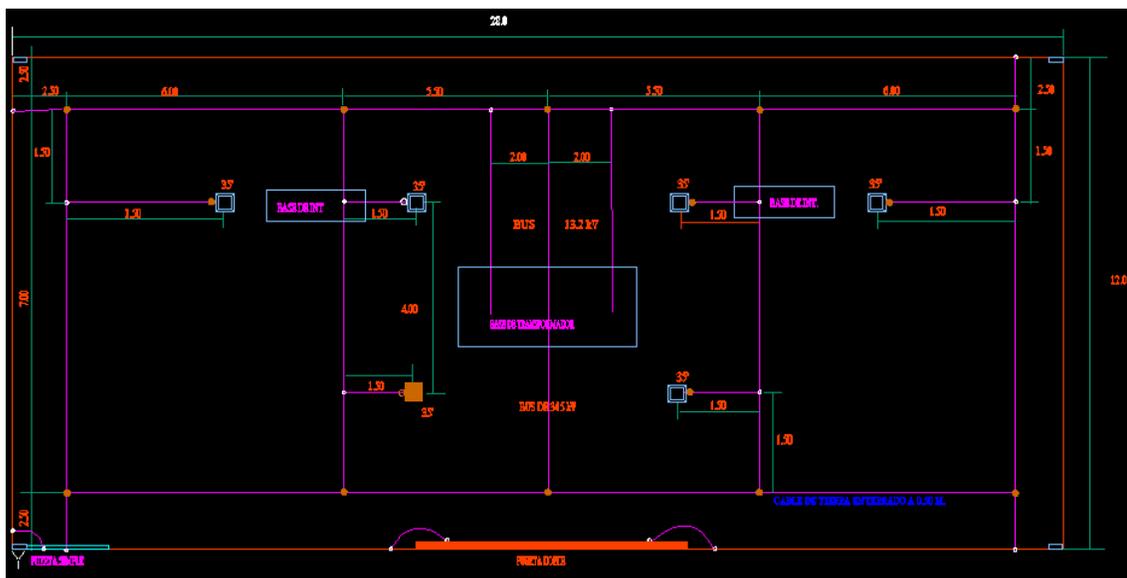


Figura 2.2 Configuración de los electrodos de la malla de la Subestación de 6 postes de 34.5/13.2 kV, proyecto UNE.

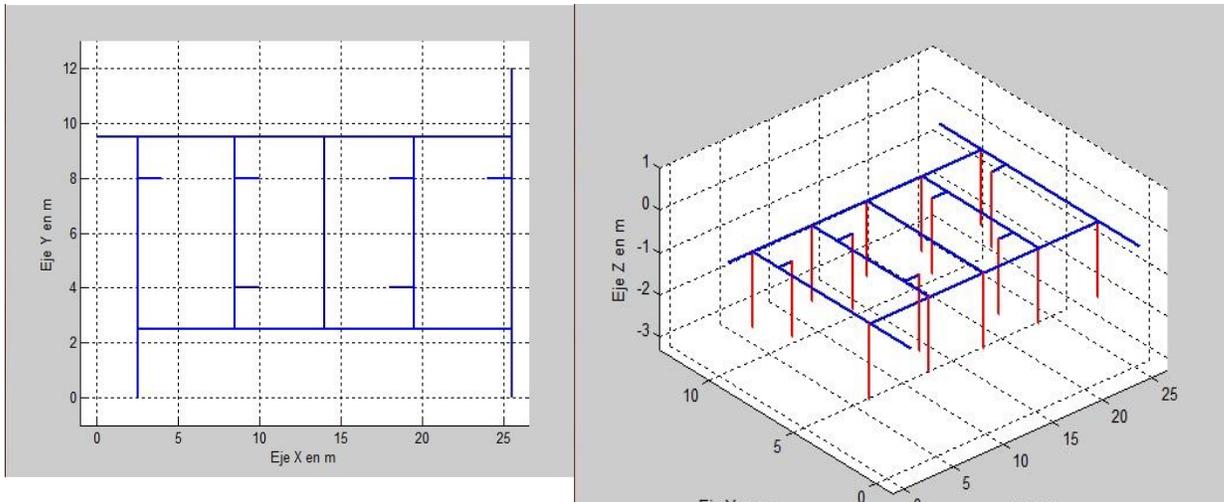


Figura 2.3 Configuración de electrodos de la subestación de 6 postes de 34.5/13.2 kV, según PAST.

2.1.2 Malla de Subestación de 2 postes de 34.5/13.2 kV.

La malla del sistema de puesta a tierra de la Subestación de 2 postes de 34.5/13.2 kV está formado por un reticulado de 10.0 m de lado mayor y 8.0 m de lado menor para un área de la malla de 80.0 m² como se muestra en la figura 2.6 que fue modelado por el programa PAST. Para este reticulado se utilizó 37 m de cable trenzado de cobre electrolítico desnudo de sección 4/0 AWG (107.15mm² y 11.68mm de diámetro exterior, cable horizontal), a una profundidad de 0.5 m con respecto al nivel del terreno se conectaron 10 electrodos verticales a lo largo y dentro del perímetro de la malla con un diámetro de 0.02 m y 3 m de longitud cada uno. Los electrodos tanto verticales como horizontales son unidos por soldaduras exotérmicas. En la figura 2.4 y 2.5 se muestra el modelo del proyecto propuesto por la Unión Eléctrica de la configuración de los electrodos y de la subestación.

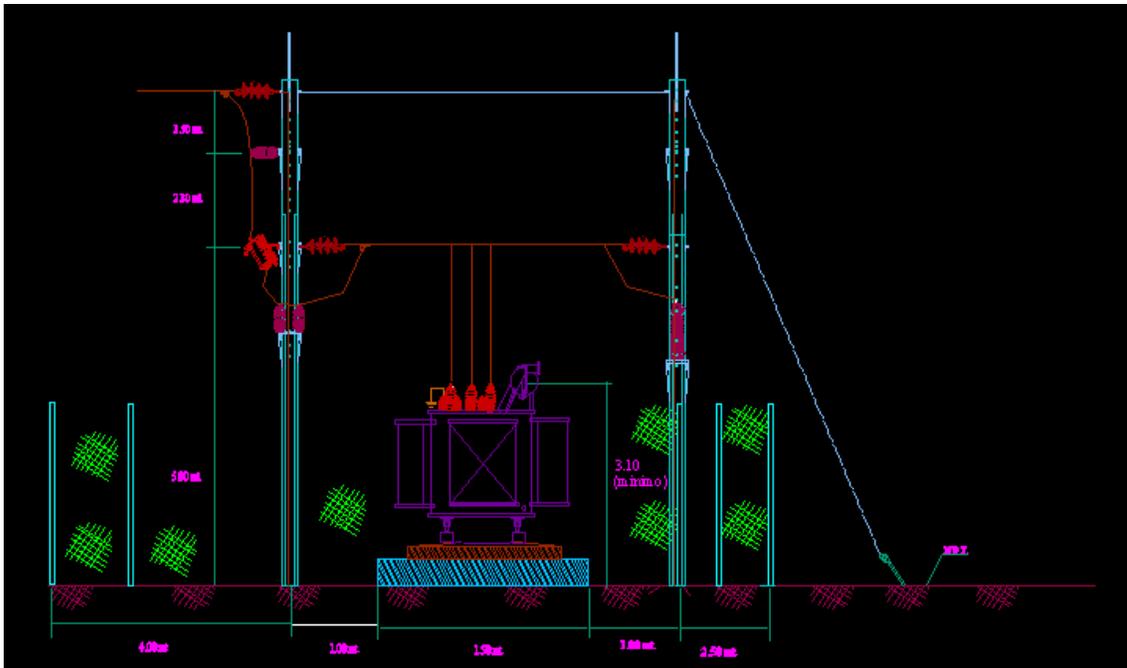


Figura 2.4 Modelo de la Subestación de 2 postes de 34.5/13.2 kV, proyecto UNE.

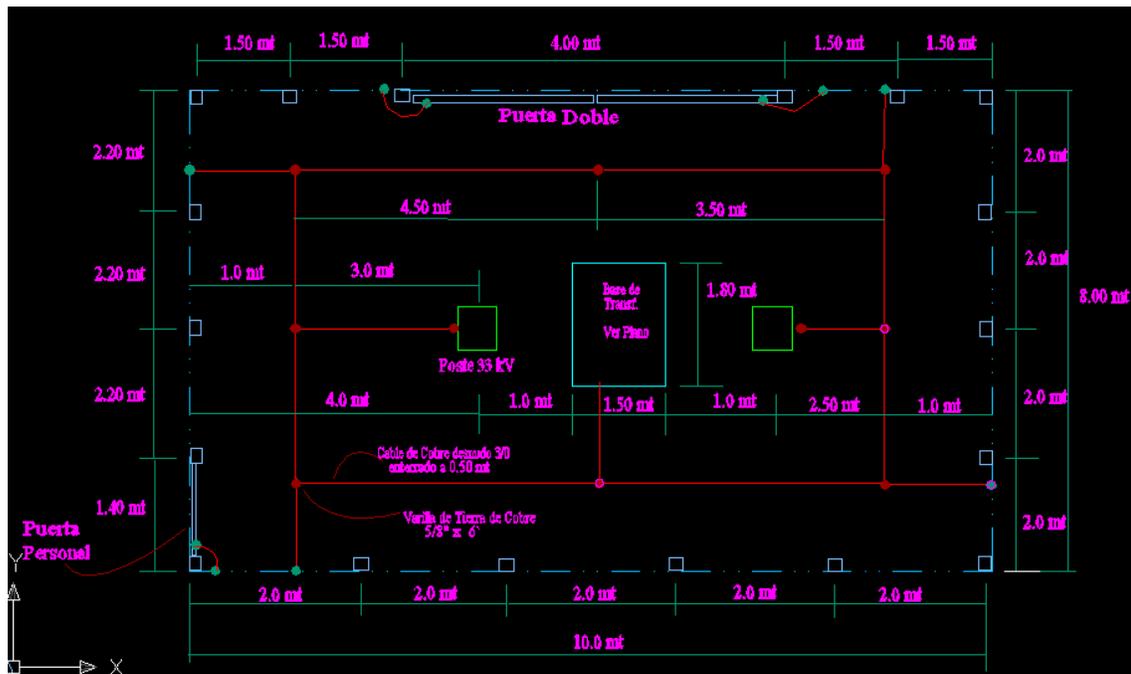


Figura 2.5 Configuración de los electrodos de la malla de la Subestación de 2 postes de 34.5/13.2 kV, proyecto UNE.

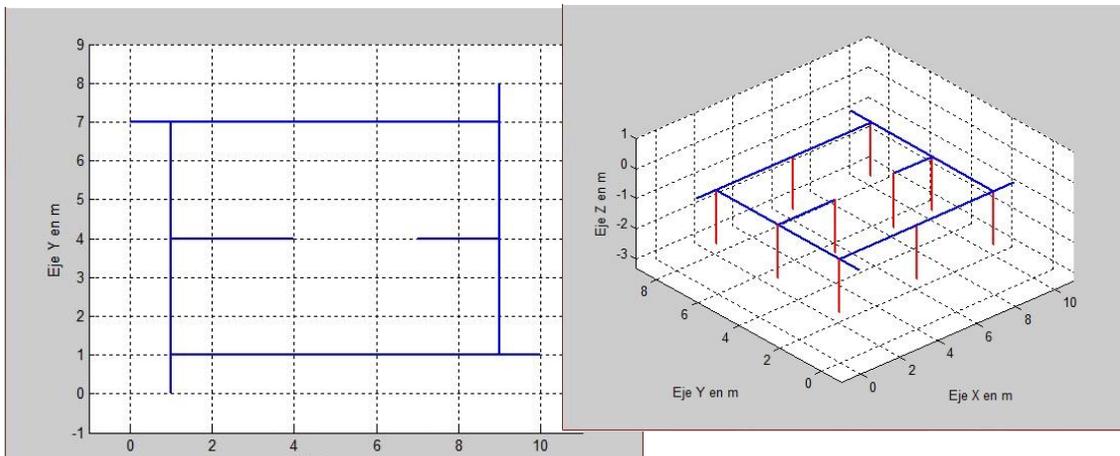


Figura 2.6 Configuración de electrodos de la subestación de 2 postes de 34.5/13.2 kV, según PAST.

2.1.3 Malla de Subestación de 1 poste de 34.5/13.2 kV.

La malla del sistema de puesta a tierra de la Subestación de 1 postes de 34.5/13.2 kV está formado por un reticulado de 10.0 m de lado mayor y 8.0 m de lado menor para un área de la malla de 80.0 m² como se muestra en la figura 2.9 que fue modelado por el programa PAST. Para este reticulado se utilizó 35 m de cable trenzado de cobre electrolítico desnudo de sección 4/0 AWG (107.15 mm² y 11.68 mm de diámetro exterior, cable horizontal), a una profundidad de 0.5 m con respecto al nivel del terreno se conectaron 9 electrodos verticales a lo largo y dentro del perímetro de la malla con un diámetro de 0.02 m y 3 m de longitud cada uno. Los electrodos tanto verticales como horizontales son unidos por soldaduras exotérmicas. En la figura 2.7 y 2.8 se muestra el modelo del proyecto propuesto por la Unión Eléctrica de la configuración de los electrodos y de la subestación.

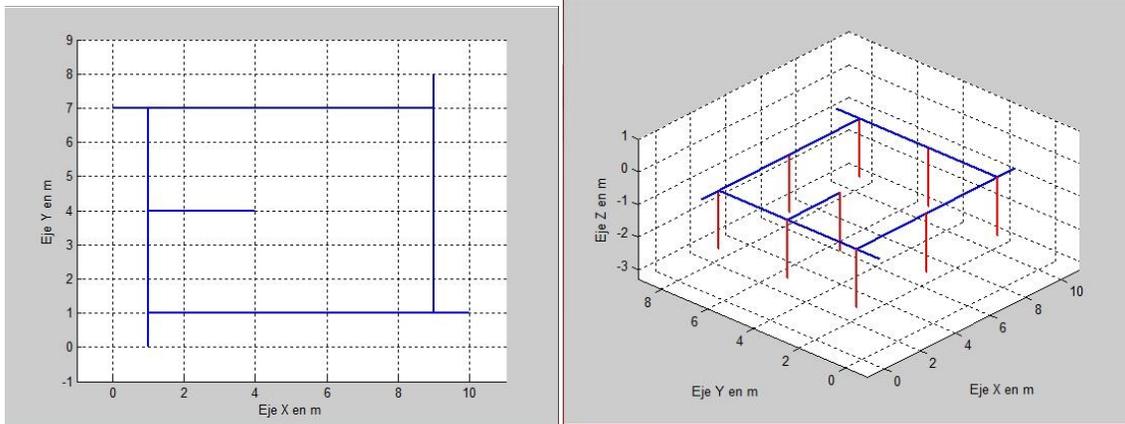


Figura 2.9 Configuración de electrodos de la subestación de 1 postes de 34.5/13.2 kV, según PAST.

2.2 Análisis de las tensiones de paso y contacto.

Se prosigue con el análisis de las tensiones de paso y de contacto para las mallas propuestas por la Unión Eléctrica. En este caso para una corriente de cortocircuito de 2000 A, resistividad de la capa superficial de 3500 Ω .m y un tiempo de falla de 1 s.

2.2.1 Malla de Subestación de 6 postes de 34.5/13.2 kV.

En esta malla se puede apreciar en la figura 2.10 que la tensión de contacto máxima 10070.4 V es mucho mayor que la permisible por el cuerpo humano 735.8483 V.

En la figura 2.11, la tensión de paso máxima (3013.3008 V) es mayor que la tensión permisible por el cuerpo humano (2472.3932 V).

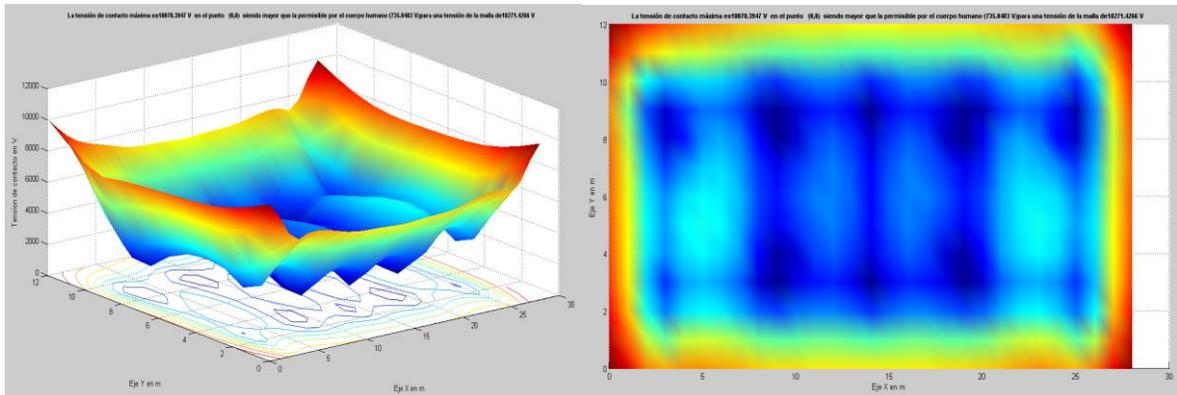


Figura 2.10 La tensión de contacto máxima es de 10070.3947 V, siendo mayor que la permisible por el cuerpo humano (735.8483 V), para una tensión de la malla de 18271.4266.

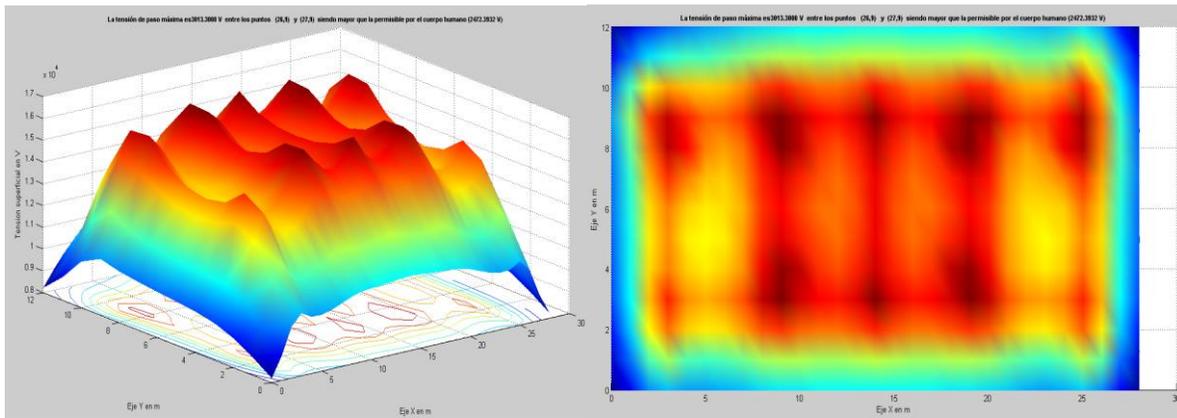


Figura 2.11 La tensión de paso máxima es de 3013.3008 V, siendo mayor que la permisible por el cuerpo humano (2472.3932 V).

Estos muy elevados niveles de potencial, puede traer como consecuencia un gran peligro para las personas que por alguna razón puedan estar cerca o dentro de la subestación en el momento de la falla.

2.2.2 Malla de Subestación de 2 postes de 34.5/13.2 kV.

La tensión de contacto máxima para esta malla es de 14612.8016 V siendo mayor que la permisible por el cuerpo humano (735.8483 V), se puede apreciar en la figura 2.12. La tensión de paso máxima es de 6249.349 V para una tensión permisible por el cuerpo humano (2472.3932 V), como se muestra en la figura 2.13.

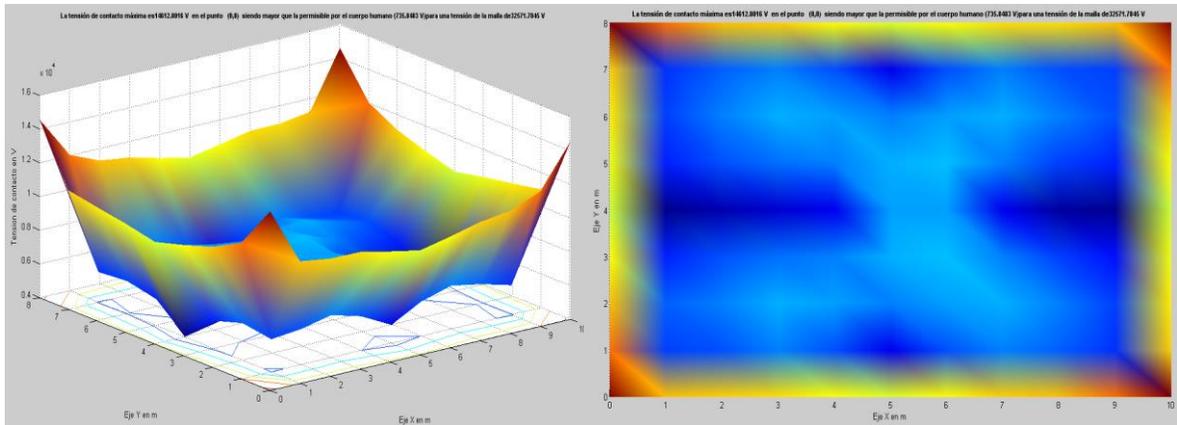


Figura 2.12 La tensión de contacto máxima es de 14612.8016 V, siendo mayor que la permisible por el cuerpo humano (735.8483 V) para una tensión de la malla (32571.7845 V).

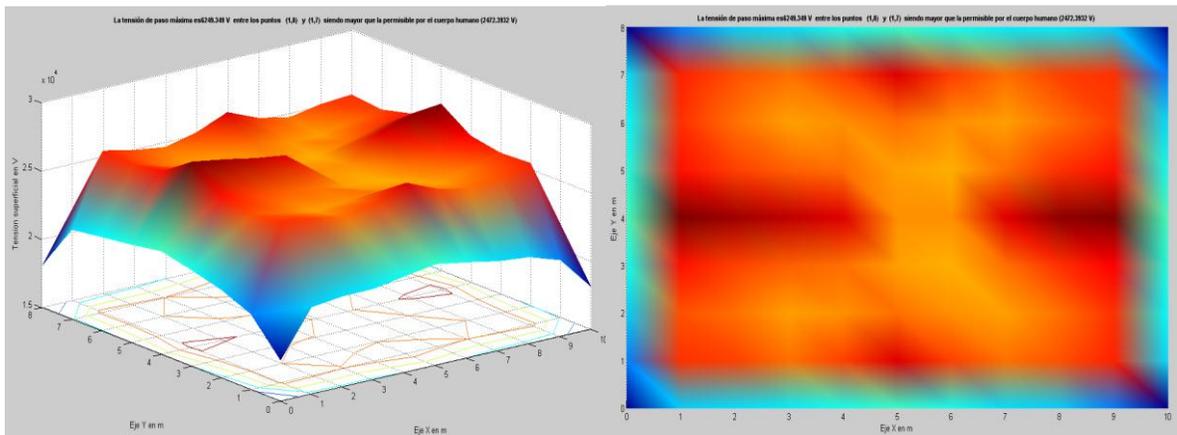


Figura 2.13 La tensión de paso máxima es de 6249.349 V, siendo mayor que la permisible por el cuerpo humano (2472.3932 V).

En esta subestación ocurre lo mismo que en la subestación anterior, los niveles de potencial se encuentran muy elevados, lo que puede traer como consecuencia un gran peligro para las personas que por alguna razón puedan estar cerca o dentro de la subestación en el momento de la falla.

2.2.3 Malla de Subestación de 1 postes de 34.5/13.2 kV.

Se puede observar en la figura 2.14 que la tensión de contacto máxima es de 15103.8023 V tiene un margen de diferencia de 14617.9945 V con respecto a la permisible por el cuerpo humano (735.8483 V), lo cual es muy peligroso para

cualquier persona que este en el momento de falla en las cercanías de la subestación. En la figura 2.15 se puede visualizar que la tensión de paso permisible por el cuerpo humano es de 6469.7901 V está muy por encima que la permisible por el cuerpo humano (2472.3932 V), lo que también trae consigo el peligro antes mencionado.

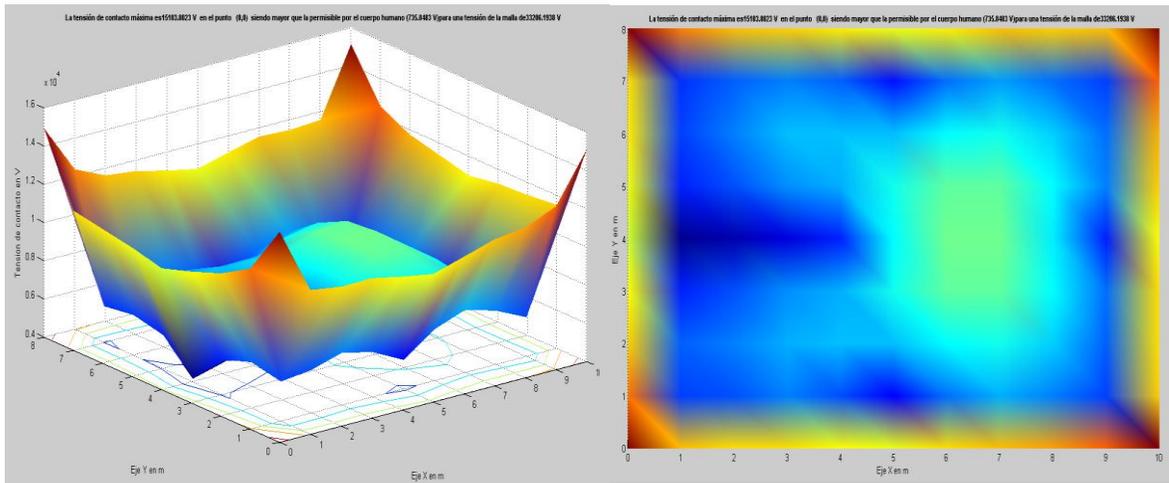


Figura 2.14 La tensión de contacto máxima es de 15103.8023 V, siendo mayor que la permisible por el cuerpo humano (735.8483 V) para una tensión de la malla (33206.1938 V).

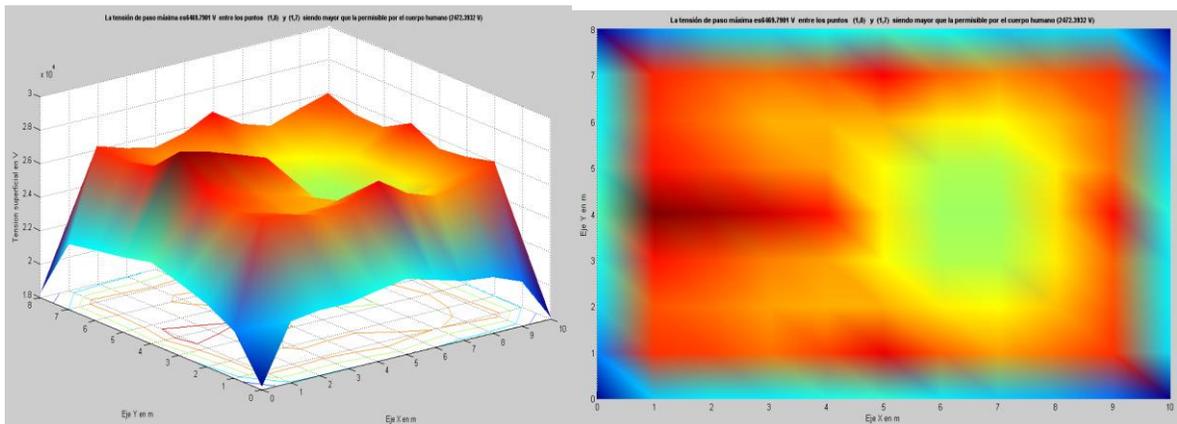


Figura 2.15 La tensión de paso máxima es de 6469.7901 V, siendo mayor que la permisible por el cuerpo humano (2472.3932 V).

En resumen para los tres tipos de subestaciones analizados, los niveles de tensión superan ampliamente los valores permisibles, lo que hace que estas propuestas

no cumplan con su función fundamental, la de garantizar seguridad a las personas en condiciones de falla.

2.3 Análisis de la resistencia de puesta a tierra.

En este epígrafe se realizará un análisis del comportamiento de la resistencia de puesta a tierra con respecto a la resistividad del terreno para las distintas mallas de las subestaciones que se trataron en los epígrafes anteriores, a partir de la figura 2.16 expuesta a continuación:

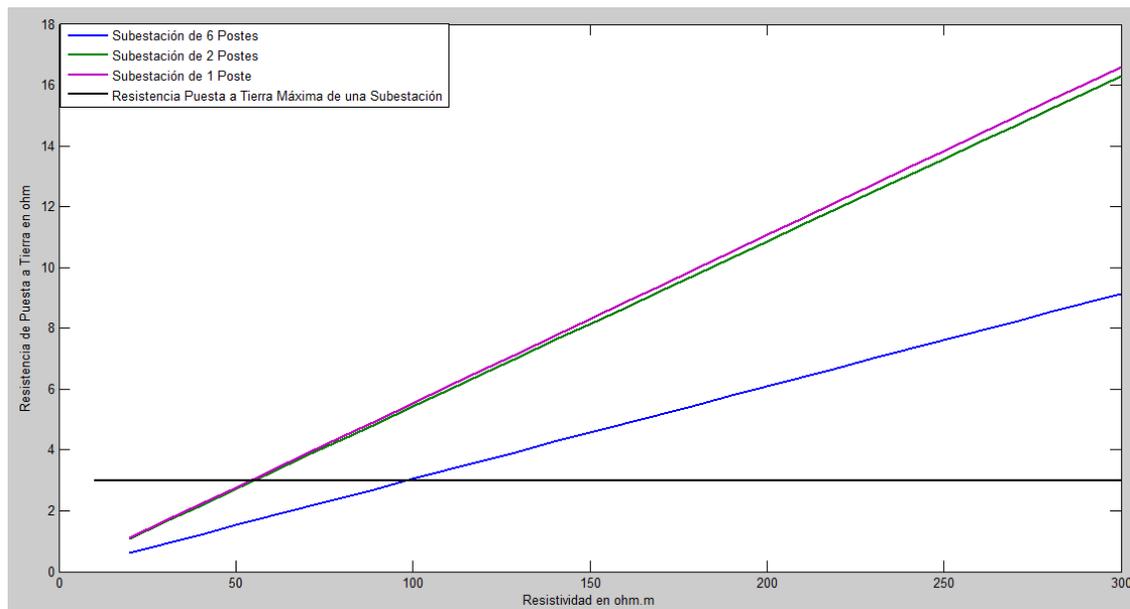


Figura 2.16 Comportamiento de la Resistencia de Puesta a Tierra con respecto a la Resistividad del Terreno.

A continuación se analizarán las mallas de las Subestaciones por separado.

2.3.1 Malla de Subestación de 6 postes de 34.5/13.2 kV.

Como se observa en la figura 2.17, esta configuración solo cumple con el valor de resistencia de puesta a tierra normado (3Ω) para un terreno que tenga como máximo un valor de 100 ohm.m.

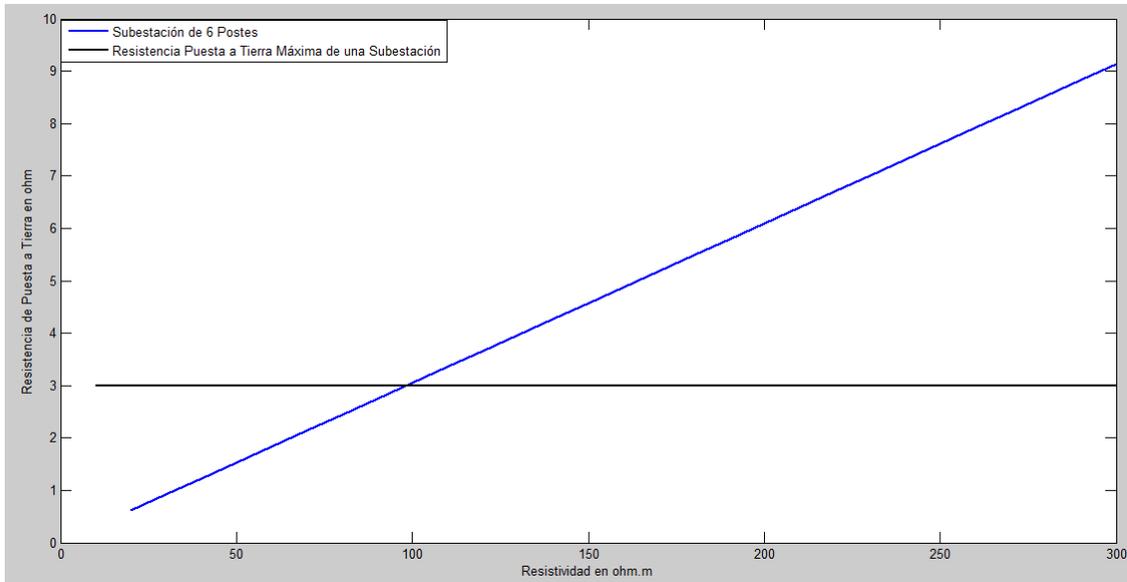


Figura 2.17 Comportamiento de la Resistencia de Puesta a Tierra con respecto a la Resistividad del Terreno de la Malla de la Subestación de 6 postes de 34.5/13.2 kV.

2.3.2 Malla de Subestación de 2 postes de 34.5/13.2 kV.

Para esta otra subestación como se observa en la figura 2.18, esta configuración solo cumple con el valor de resistencia de puesta a tierra normado (3Ω) para un terreno que tenga como máximo un valor de 55 ohm.m.

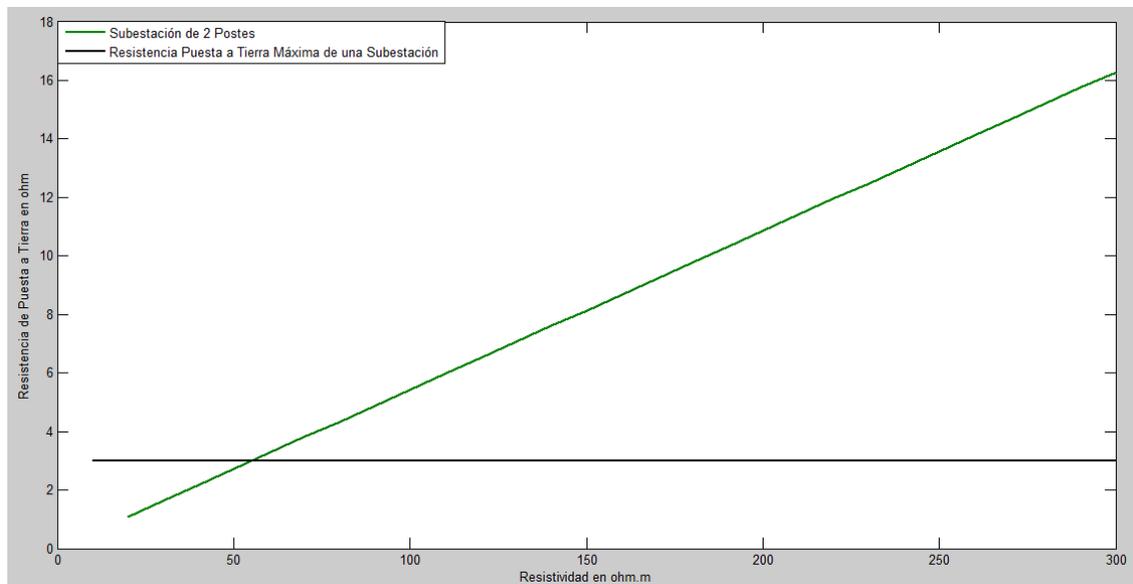


Figura 2.18 Comportamiento de la Resistencia de Puesta a Tierra con respecto a la Resistividad del Terreno de la Malla de la Subestación de 2 postes de 34.5/13.2 kV.

2.3.3 Malla de Subestación de 1 postes de 34.5/13.2 kV.

Por último para esta subestación como se observa en la figura 2.19, esta configuración solo cumple con el valor de resistencia de puesta a tierra normado (3Ω) para un terreno que tenga como máximo un valor de 55 ohm.m.

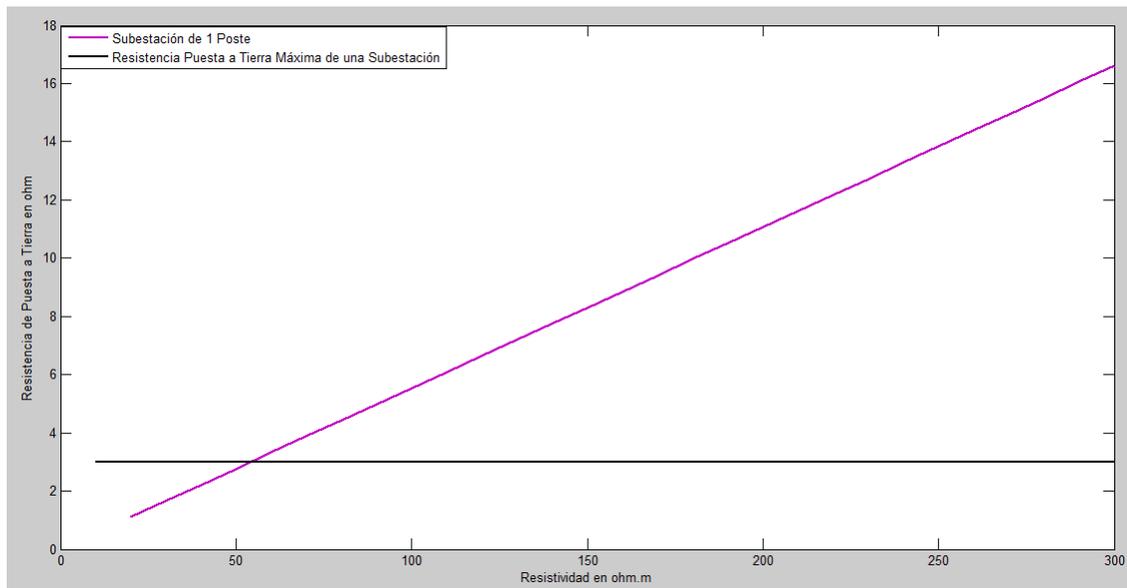


Figura 2.19 Comportamiento de la Resistencia de Puesta a Tierra con respecto a la Resistividad del Terreno de la Malla de la Subestación de 1 postes de 34.5/13.2 kV

Con respecto a la resistencia de puesta a tierra en las tres subestaciones es prácticamente imposible cumplir con el valor normado, incluso si se pudiera elevar a 5 o 10Ω , los terrenos en que se pudieran cumplir estos valores, tendrían que tener una resistividad inferior a los $200 \Omega.m$.

CAPÍTULO 3. Determinación de la posibilidad de desarrollar proyectos típicos de sistemas de puesta a tierra de Subestaciones de 34.5/13.2 kV que tengan en cuenta la resistividad del terreno y las condiciones de cortocircuito.

3.1 Características de las mallas diseñadas con el programa PAST.

En el presente capítulo se determina el desarrollo de mallas de puesta a tierra con la ayuda del programa PAST, también se analizan aspectos tales como los potenciales de paso y contacto, y el comportamiento de la tensión de contacto para diferentes valores de resistividad del terreno y condiciones de corrientes de cortocircuito.

3.1.1 Malla de Subestación de 6 postes de 34.5/13.2 kV.

La malla del sistema de puesta a tierra de la Subestación de la figura 3.1 está formado por un reticulado de 28.0 m de lado mayor y 12.0 m de lado menor para un área de la malla de 336.0 m², la configuración fue modelada con la ayuda del programa PAST. Para este reticulado se utilizó 160 m de cable trenzado de cobre electrolítico desnudo de sección 4/0 AWG (107.15 mm² y 11.68 mm de diámetro exterior, cable horizontal), a una profundidad de 0.5 m con respecto al nivel del terreno se conectaron 4 electrodos verticales a lo largo y dentro del perímetro de la malla con un diámetro de 0.02 m y 3 m de longitud cada uno. Los electrodos tanto verticales como horizontales son unidos por soldaduras exotérmicas.

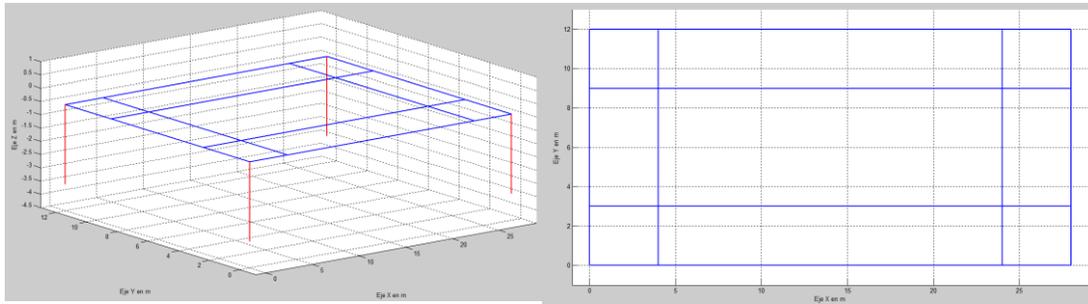


Figura 3.1 Configuración de electrodos de la subestación de dimensión 28x12 m de 34.5/13.2 kV.

3.1.2 Mallas de Subestaciones de 1 y 2 postes de 34.5/13.2 kV.

En este caso se propone un solo proyecto ya que las dimensiones de estas subestaciones son iguales (10 x 8 m). La malla del sistema de puesta a tierra de la Subestación de la figura 3.2 está formado por un reticulado de 10.0 m de lado mayor y 8.0 m de lado menor para un área de la malla de 80.0 m², la configuración fue modelada con la ayuda del programa PAST. Para este reticulado se utilizó 110 m de cable trenzado de cobre electrolítico desnudo de sección 4/0 AWG (107.15 mm² y 11.68 mm de diámetro exterior, cable horizontal), a una profundidad de 0.5 m con respecto al nivel del terreno se conectaron 28 electrodos verticales a lo largo y dentro del perímetro de la malla con un diámetro de 0.02 m y 3 m de longitud cada uno. Los electrodos tanto verticales como horizontales son unidos por soldaduras exotérmicas.

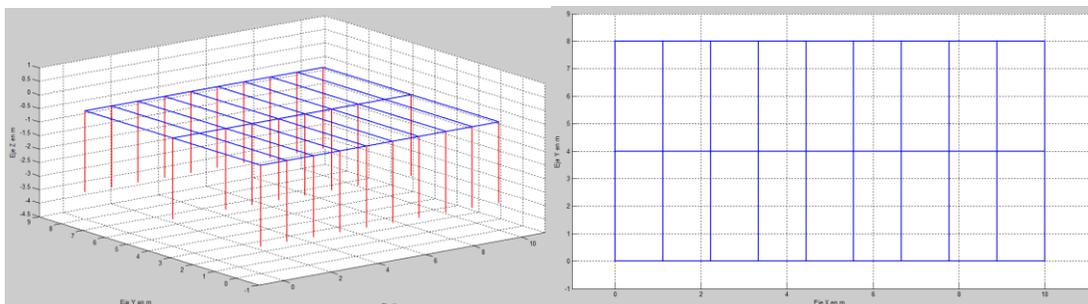


Figura 3.2 Configuración de electrodos de la subestación de dimensión 10x8 m de 34.5/13.2 kV.

3.2 Análisis de las tensiones de paso y contacto de las mallas propuestas.

3.2.1 Malla de Subestación de 6 postes de 34.5/13.2 kV.

En la figura 3.3 se muestra la gráfica de tensión de contacto en la que se puede apreciar que la tensión de contacto máxima (1581.722 V) es menor que la permisible por el cuerpo humano (2326.9866 V), en la gráfica que se muestra en la figura 3.4 se observa que la tensión de paso máxima (391.5301 V) es menor que la permisible por el cuerpo humano (7818.3938 V), por lo que esta malla cumple con los valores permisible.

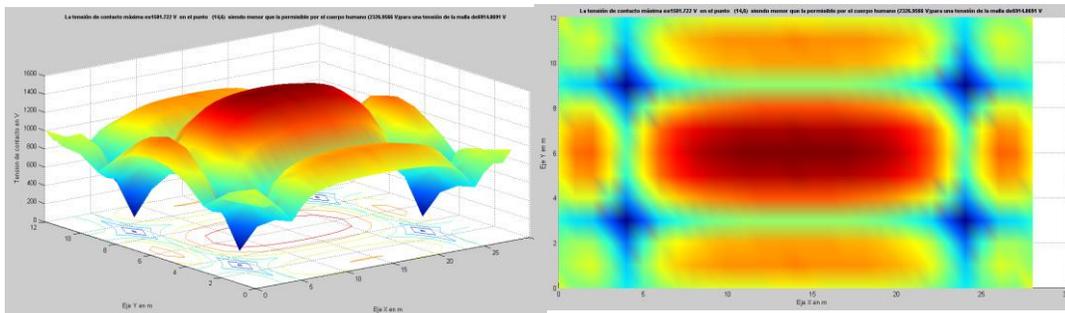


Figura 3.3 La tensión de contacto máxima es de 1581.722 V, siendo menor que la permisible por el cuerpo humano (2326.9566 V), para una tensión de la malla de 6914.8691 V.

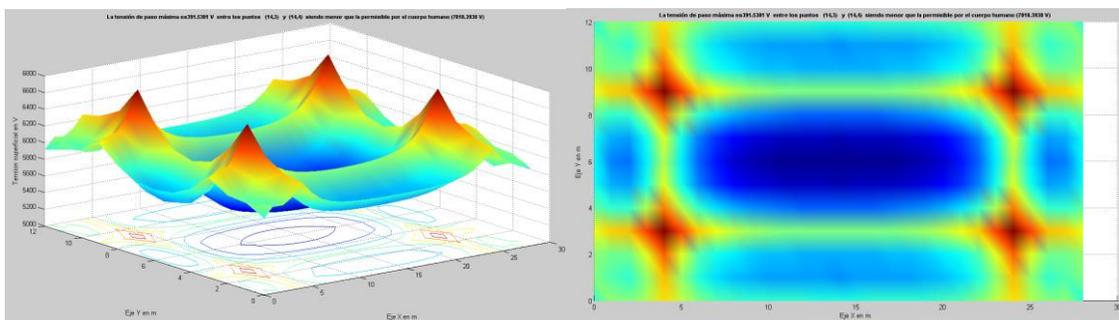


Figura 3.4 La tensión de paso máxima es de 391.5301 V, siendo menor que la permisible por el cuerpo humano (7818.3938 V).

3.2.2 Mallas de Subestaciones de 1 y 2 postes de 34.5/13.2 kV.

Se muestra en la figura 3.5 que la tensión de contacto máxima (1306.9028 V) es menor que la permisible por el cuerpo humano (2326.9566 V), la tensión de paso máxima es menor (628.8722 V) que la permisible por el cuerpo humano

(7818.3938 V) como se puede observar en la figura 3.6, por lo que esta malla también cumple con los valores tolerables de tensión.

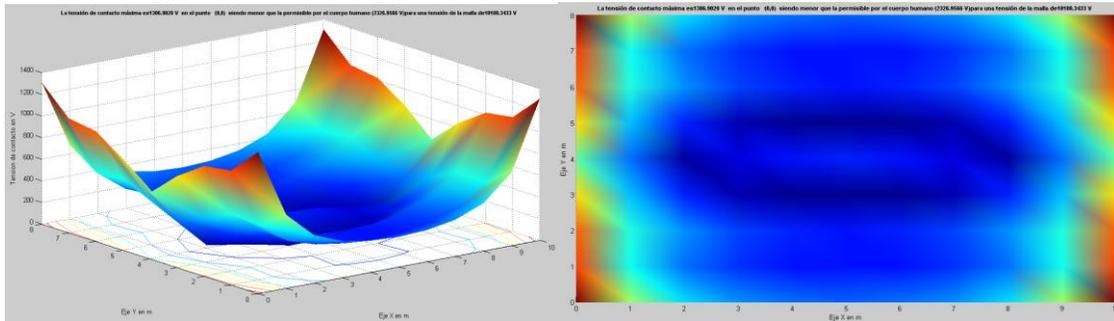


Figura 3.5 La tensión de contacto máxima es de 1306.9028 V, siendo menor que la permisible por el cuerpo humano (2326.9566 V), para una tensión de la malla de 10188.3433 V.

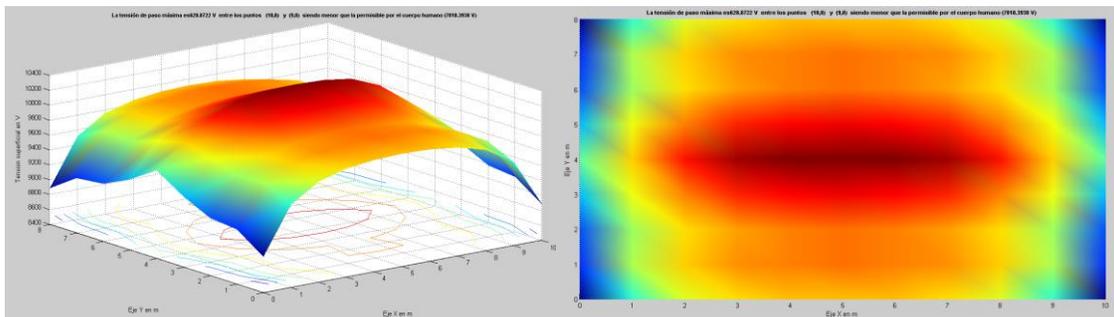


Figura 3.6 La tensión de paso máxima es de 628.8722 V, siendo menor que la permisible por el cuerpo humano (7818.3938 V).

3.3 Análisis de las tensiones de contacto teniendo en cuenta la resistividad del terreno para diferentes corrientes de cortocircuitos.

En este epígrafe se analiza la tensión de contacto de las mallas analizadas en el epígrafe anterior con la ayuda del programa PAST, teniendo en cuenta la resistividad del terreno para diferentes condiciones de cortocircuito y tiempos de limpieza de las fallas.

3.3.1 Malla para una subestación de 6 postes de 34.5/13.2 kV.

Se puede apreciar en la figura 3.7, que para un tiempo de limpieza de la falla de 0.1 segundo y corrientes de cortocircuito de 1000A, 1500A, 2000A, 2500A y 3000A, respectivamente, esta malla puede ser instalada en terrenos cuyas resistividades máximas sean de 450 ohm m, 300 ohm m, 230 ohm m, 180 ohm m y 150 ohm m, respectivamente.

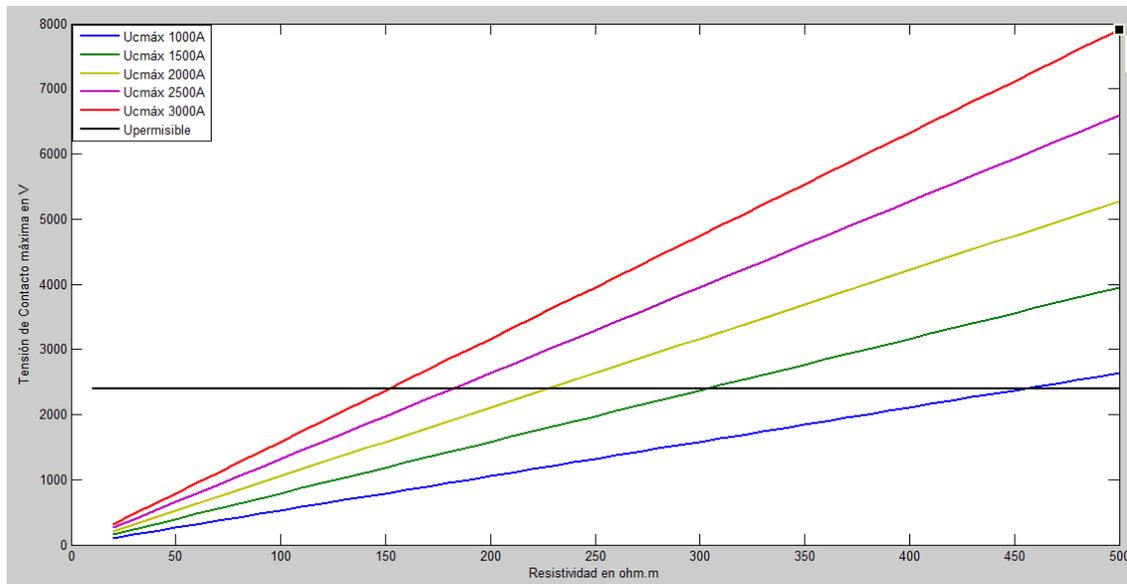


Figura 3.7 Comportamiento de las tensiones de contacto teniendo en cuenta la resistividad del terreno para diferentes corrientes de cortocircuitos y un tiempo de limpieza de la falla de 0.1 segundo.

Igualmente, se puede observar en la figura 3.8, que para un tiempo de limpieza de la falla de 0.5 segundo y corrientes de cortocircuito de 1000A, 1500A, 2000A, 2500A y 3000A, respectivamente, esta malla puede ser instalada en terrenos cuyas resistividades máximas sean de 230 ohm m, 145 ohm m, 110 ohm m, 80 ohm m y 70 ohm m, respectivamente.

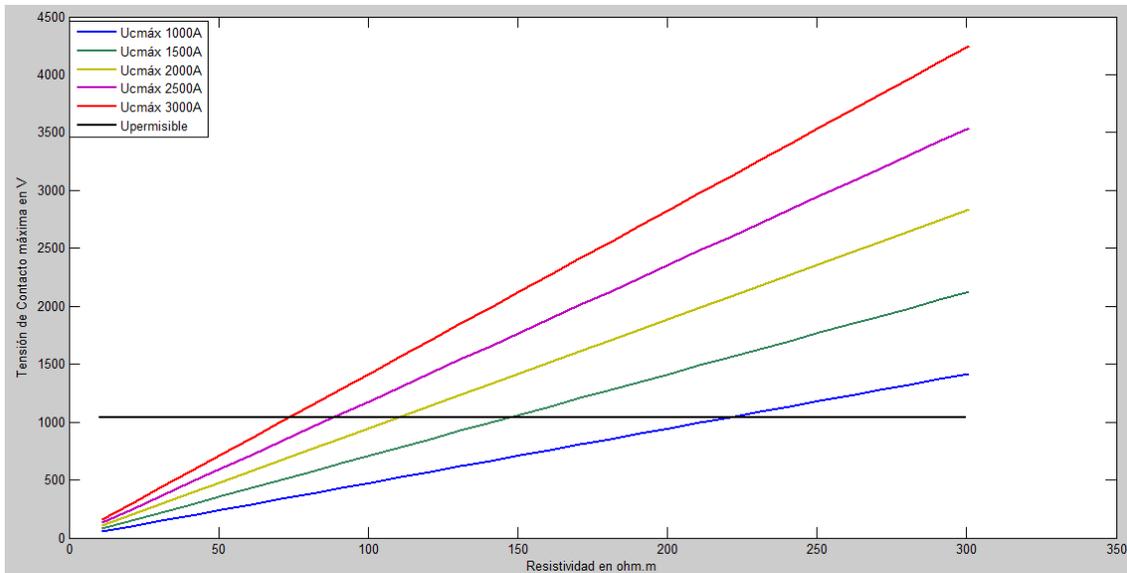


Figura 3.8 Comportamiento de las tensiones de contacto teniendo en cuenta la resistividad del terreno para diferentes corrientes de cortocircuitos y un tiempo de limpieza de la falla de 0.5 segundo.

Asimismo, en la figura 3.9, para un tiempo de limpieza de la falla de 1 segundo y corrientes de cortocircuito de 1000A, 1500A, 2000A, 2500A y 3000A, respectivamente, esta malla puede ser instalada en terrenos cuyas resistividades máximas sean de 160 ohm m, 100 ohm m, 70 ohm m, 60 ohm m y 50 ohm m, respectivamente.

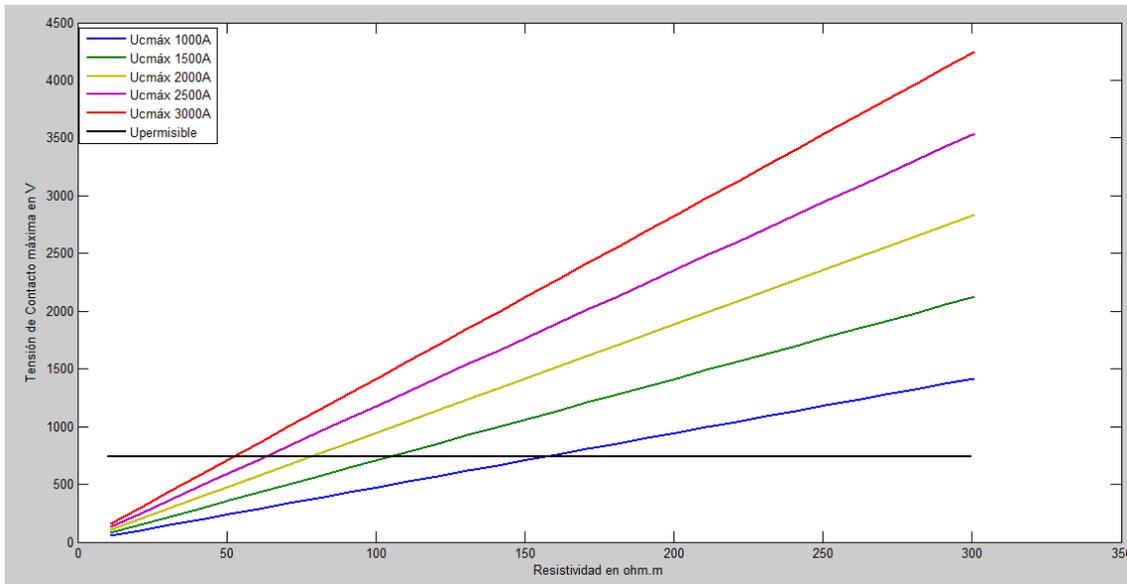


Figura 3.9 Comportamiento de las tensiones de contacto teniendo en cuenta la resistividad del terreno para diferentes corrientes de cortocircuitos y un tiempo de limpieza de la falla de 1 segundo.

3.3.2 Malla para las subestaciones de 1 y 2 postes de 34.5/13.2 kV.

Se puede apreciar en la figura 3.10, que para un tiempo de limpieza de la falla de 0.1 segundo y corrientes de cortocircuito de 1000A, 1500A, 2000A, 2500A y 3000A, respectivamente, esta malla puede ser instalada en terrenos cuyas resistividades máximas sean de 560 ohm m (como muestra la figura 3.10.a), 370 ohm m, 280 ohm m, 220 ohm m y 180 ohm m, respectivamente.

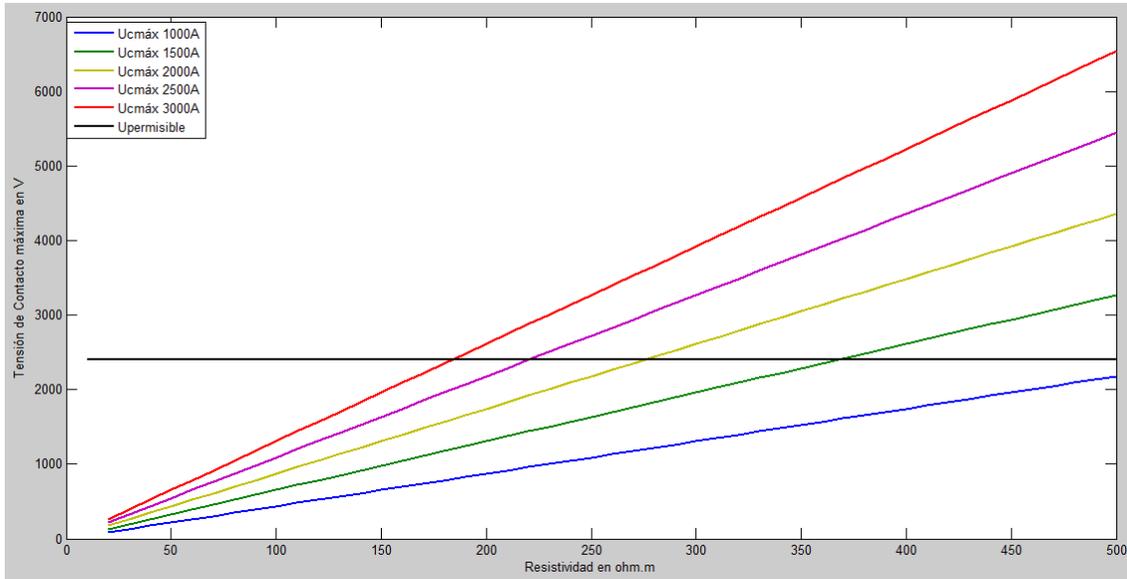


Figura 3.10 Comportamiento de las tensiones de contacto teniendo en cuenta la resistividad del terreno para diferentes corrientes de cortocircuitos y un tiempo de limpieza de la falla de 0.1 segundo.

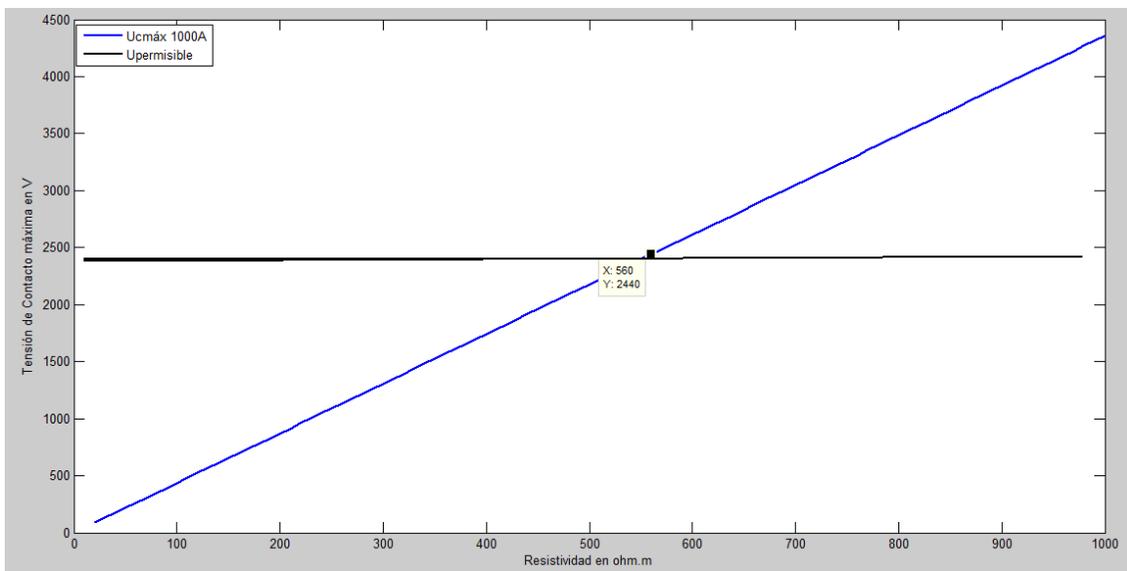


Figura 3.10. Comportamiento de las tensiones de contacto teniendo en cuenta la resistividad del terreno para una corriente de cortocircuito de 1000 A y un tiempo de limpieza de la falla de 0.1 segundo.

Similarmente, se puede observar en la figura 3.11, que para un tiempo de limpieza de la falla de 0.5 segundo y corrientes de cortocircuito de 1000A, 1500A, 2000A, 2500A y 3000A, respectivamente, esta malla puede ser instalada en terrenos cuyas resistividades máximas sean de 240 ohm m, 160 ohm m, 130 ohm m, 90 ohm m y 75 ohm m, respectivamente.

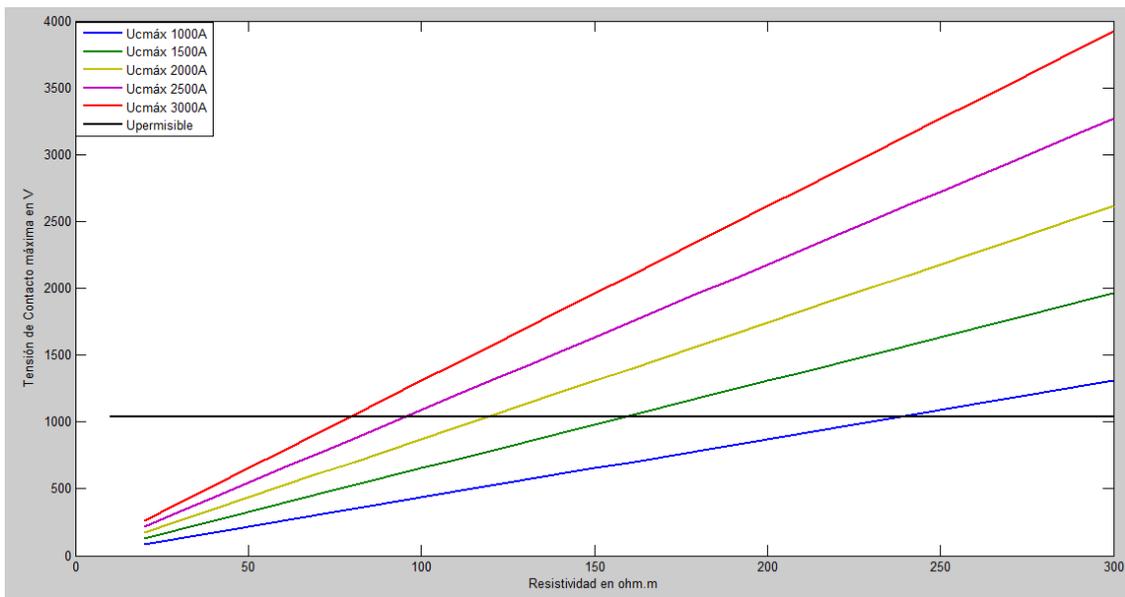


Figura 3.11 Comportamiento de las tensiones de contacto teniendo en cuenta la resistividad del terreno para diferentes corrientes de cortocircuitos y un tiempo de limpieza de la falla de 0.5 segundo.

De la misma forma, en la figura 3.12, para un tiempo de limpieza de la falla crítico de 1 segundo y corrientes de cortocircuito de 1000A, 1500A, 2000A, 2500A y 3000A, respectivamente, esta malla puede ser instalada en terrenos cuyas resistividades máximas sean de 170 ohm m, 110 ohm m, 85 ohm m, 65 ohm m y 55 ohm m, respectivamente.

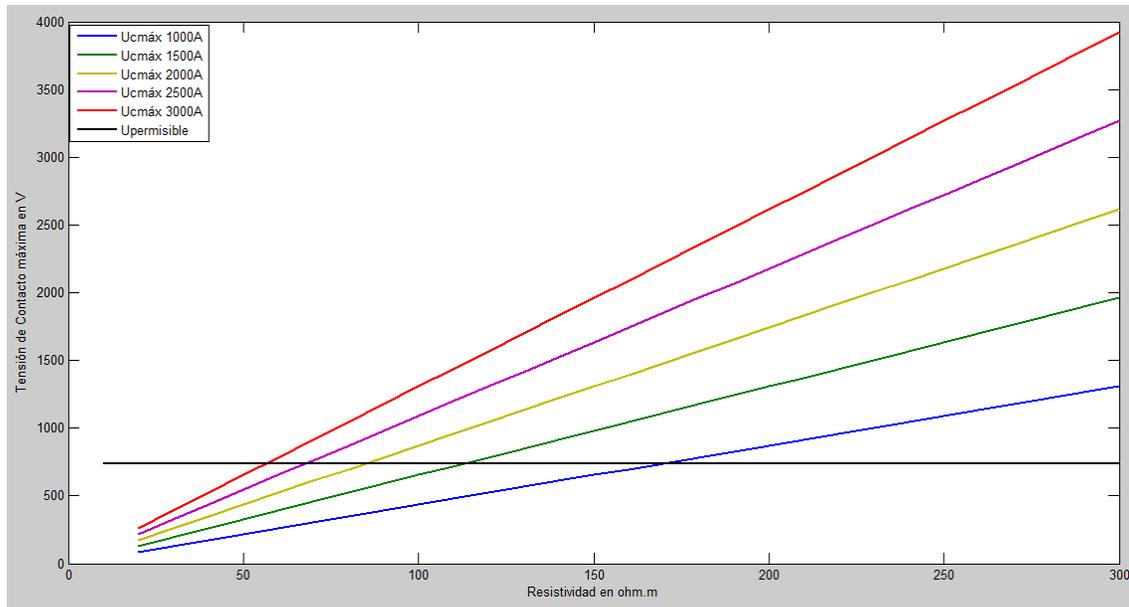


Figura 3.12 Comportamiento de las tensiones de contacto teniendo en cuenta la resistividad del terreno para diferentes corrientes de cortocircuitos y un tiempo de limpieza de la falla de 1 segundo.

3.4 Análisis de la resistencia de puesta a tierra.

En este epígrafe se analiza el comportamiento de la resistencia de puesta a tierra con respecto a la resistividad del terreno de las mallas de las subestaciones de 6, 1 y 2 postes de 34.5/13.2 kV.

A continuación en el próximo subepígrafe se realiza el análisis teniendo en cuenta la figura 3.13 de las mallas de las subestaciones ya comentadas en el epígrafe anterior.

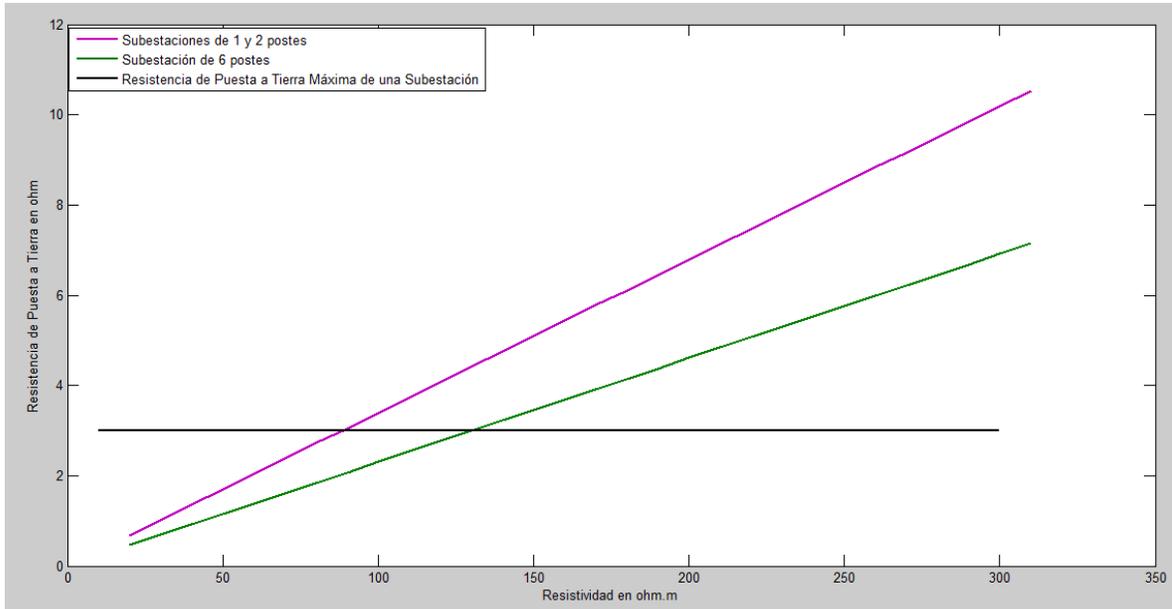


Figura 3.13 Comportamiento de la resistencia de puesta a tierra considerando la resistividad del terreno.

Seguidamente se expondrá el análisis de las subestaciones por separado.

3.4.1 Malla para una subestación de 6 postes de 34.5/13.2 kV.

En la figura 3.14 se observa que esta configuración cumple con el valor de resistencia de puesta a tierra normado (3Ω) para un terreno que tenga como máximo un valor de 130 ohm.m.

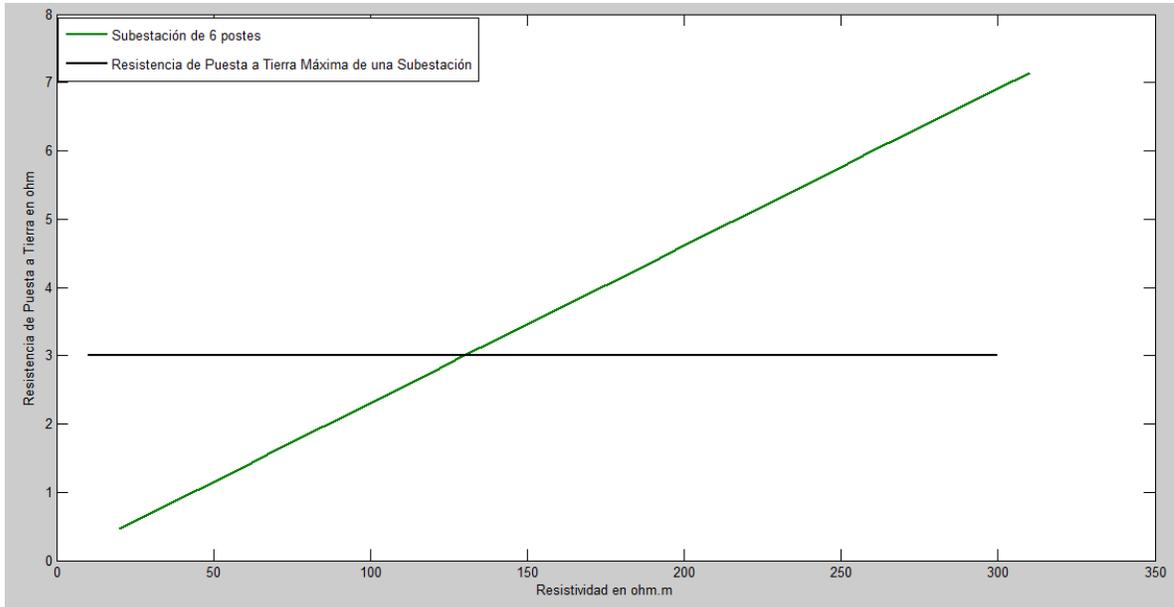


Figura 3.14 Comportamiento de la resistencia de puesta a tierra considerando la resistividad del terreno.

3.4.2 Malla para las subestaciones de 1 y 2 postes de 34.5/13.2 kV.

En el caso de la subestación de 1 y 2 postes que se muestra en la figura 3.15 se aprecia que esta configuración cumple con el valor de resistencia de puesta a tierra normado (3Ω) para un terreno que tenga como máximo un valor de 85 ohm.m.

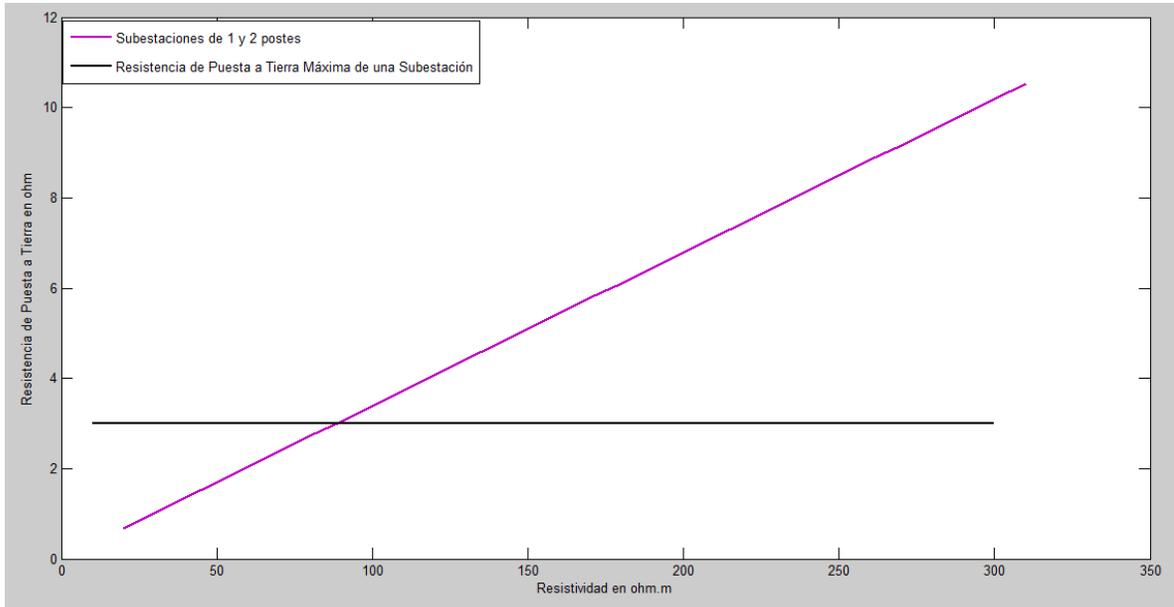


Figura 3.15 Comportamiento de la resistencia de puesta a tierra considerando la resistividad del terreno.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez concluido el informe se arribaron a las siguientes conclusiones:

1. En los proyectos típicos propuestos por la Unión Eléctrica de mallas de sistemas de puesta a tierra de subestaciones de 34.5/13.2 kV de 6, 2 y 1 poste, los niveles de tensión de contacto y de paso, y la resistencia de puesta a tierra, superan ampliamente los valores permisibles y normados, para los niveles de resistividad de terreno más comunes, incumpliendo con las especificaciones de proyecto, lo que hace que dichas propuestas no cumplan con su función fundamental, la de garantizar seguridad a las personas en condiciones de falla.
2. Las mallas diseñadas con la ayuda del programa PAST cumplen con los niveles permisibles de tensión de contacto y de paso, incumpliendo con la resistencia de puesta a tierra a causa fundamentalmente de las pequeñas dimensiones de estas subestaciones de 34.5/13.2 kV, lo que hace prácticamente imposible disminuir la resistencia de puesta a tierra a los valores normados para terrenos de una resistividad entre 100 y 300 $\Omega.m$ que son los más comunes.

Recomendaciones:

1. Proponer a la Unión Eléctrica una revisión de las normas, fundamentalmente con respecto a los valores máximos permisibles de resistencia y evaluando su efecto en la sensibilidad de las protecciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Mendoza, R., *Uso de las cimentaciones de las estructuras de las líneas de transmisión como sistema de puesta a tierra*. 2013.
2. Blandon, J.A. *Estado del arte en el diseño de mallas a tierra de subestaciones*. 2005; 16:[Available from: <http://www.gamma.com.co>].
3. Harper.E, *Elementos de diseño de subestaciones eléctricas*. 1978.
4. A.J., P., *Separate or Bridged High-Voltage and Low- Voltage Earth Electrodes at Distribution Transformer Station*. 1967. **Electricity in Finland 40**
5. Ortuondo.P, *Manual para el Proyecto y Análisis de Sistemas de Puesta a Tierra*. 1997, Imprenta América Ltda. Chile.
6. overvoltages, P.a., *Protection of low-voltage installations against faults between high-voltage systems and earth*, L.-A. Congress, Editor. 1993: Ubatuba, Brasil.
7. Márquez, R.G., *La Puesta a Tierra de Instalaciones Eléctricas*. 1999, México: Alfaomega.
8. Gasca, J.J.M.R.y.J.C.T., *Puesta a Tierra en Edificios y en Instalaciones Eléctricas*. 1998: España: Paraninfo.
9. R. Laurent, A.M.y.C.H., *La Interconexión de las Puestas a Tierra en Subestaciones de Distribución*. 2004: Proc. 8TH.
10. Hernández, I.J.A.A. *Sistemas de Puesta a Tierra*. 2014; Available from: <http://www.elprisma.com>.
11. Gonzalez, F., *ANÁLISIS DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN VILLA CLARA*. 2012.
12. L, A.J., *Temas de Ingeniería Eléctrica*. Vol. Tomo II. Habana, Cuba.
13. Valcárcel, Á.C., *Sistemas de puesta a tierra y protección de equipos electrónicos sensibles*, ed. C.d.E.E. Monografía. 2007, UCLV, Santa Clara.
14. R. Laurent, A.M.y.C.H., *Puestas a tierra de subestaciones transformadoras*. 2002. : Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Argentina.

15. PROCOBRE, *Mallas de tierra en edificaciones*.