



Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Centro de Estudios Electroenergéticos



Trabajo De Diploma

RECUPERACIÓN DE MALLAS DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES

Autor: *Rafael Díaz Ponce*

Tutor: *Dr. Ing. Ángel Cecilio Valcárcel Rojas*

Santa Clara

2014

"Año 56 de la Revolución"



Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Centro de Estudios Electroenergéticos



Trabajo De Diploma

RECUPERACIÓN DE MALLAS DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES

Autor: Rafael Díaz Ponce

E-mail: rdiaz@uclv.edu.cu

Tutor: Dr. C. Ángel Cecilio Valcárcel Rojas

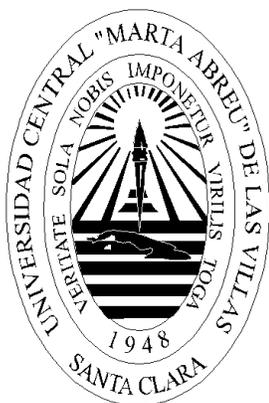
E-mail: valca@uclv.edu.cu

Centro de Estudios Electroenergéticos

Facultad de Ingeniería Eléctrica. UCLV

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

A los revolucionarios más jóvenes, especialmente, recomiendo exigencia máxima y disciplina férrea, sin ambición de poder, autosuficiencia ni vanaglorias. Usar la ciencia y la computación sin caer en lenguaje tecnicista e ininteligible de élites especializadas. Sed de saber y constancia.

Fidel Castro Ruz.

DEDICATORIA

Quiero dedicar la ejecución de esta tesis, a una persona que lo dio todo de sí por su sueño de verme graduado, la cual es la principal causa de todos mis logros y por la cual daría todo de mí para que pudiera contar con ella toda la vida. Mi madre.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a toda mi familia, quien estuvo conmigo en los momentos difíciles, principalmente a mis padres, mi hermana, a mi esposa y mi razón de vivir, mi hija. A mi tutor Ángel Valcárcel por el apoyo incondicional brindado en la ejecución de mi tesis. A todos mis amigos principalmente a Yunier, Frank, Alberto, Humberto, el riky, Suárez, Raulien y todo el que puso su granito de arena para graduarme.

TAREA TÉCNICA

Para el desarrollo de este Trabajo de Diploma se plantearon diferentes aspectos y tareas como son:

- Revisión de la bibliografía relacionada con las instalaciones de puesta a tierra y las normativas cubanas.
- Trabajo de familiarización con el programa PAST.
- Con la ayuda del programa PAST evaluar la posibilidad de implementar diferentes métodos para recuperar mallas de puesta a tierra que se encuentran en explotación y que por determinadas razones han devaluado sus parámetros fundamentales tales como potencial de paso, potencial de contacto y resistencia de puesta a tierra.
- Propuestas de mejora a algunas subestaciones del territorio.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

En este trabajo se evalúan diferentes métodos o procedimientos que permiten recuperar los parámetros fundamentales de mallas de tierra de subestaciones que por alguna razón se han devaluado, poniendo en peligro las condiciones de operación de las protecciones y lo que es peor la vida de las personas.

En la provincia de Villa Clara se han detectado algunos casos de subestaciones en las que los valores de resistencia están por encima de lo normado y en las que los potenciales aunque no se han medido, también deben estar alterados según los resultados obtenidos con el programa PAST. En estos casos se proponen posibles mejoras a ejecutar para tratar de resolver la situación o al menos mejorarla.

Por otra parte se han evaluado los casos de mallas de tierra de subestaciones y grupos electrógenos en los que los proyectos ejecutados están exageradamente sobredimensionados, donde como es lógico, el costo de instalación ha sido extremadamente grande; por lo que se determinaran las mallas de tierra que pudieran haber resultado mucho más económicas, con el objetivo de hacer un llamado de atención a los directivos de la Unión Eléctrica y evitar que casos como estos se repitan en un futuro.

TABLA DE CONTENIDOS

<i>PENSAMIENTO</i>	i
<i>DEDICATORIA</i>	ii
<i>AGRADECIMIENTOS</i>	iii
TAREA TÉCNICA	iv
RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. Estudio y análisis crítico de la bibliografía disponible y relacionada con proyectos de sistemas de puesta a tierra.	3
1.1 Definición de puesta a tierra.....	3
1.2 Objetivos de puesta a tierra.....	4
1.3 Clasificación de la puesta a tierra.....	5
1.4 Requisitos de una malla de tierra.	6
1.5 Aspectos esenciales a tener en cuenta en una malla de puesta a tierra. ...	8
1.5.1 Tensión permisible de paso.	8
1.5.2 Tensión permisible de contacto.	9
1.5.3 Configuración de la malla.	10
1.5.4 Resistividad del terreno.	11
1.5.5 Tiempo de duración del transitorio.	14

1.5.6	Conductor de la malla.....	15
1.5.7	Profundidad de enterramiento de los electrodos de la malla.....	15
1.6	Métodos para reducir la resistencia de puesta a tierra y potenciales de paso y de contacto.....	16
1.6.1	El aumento del número de electrodos horizontales en paralelo.....	16
1.6.2	El aumento de la longitud y el diámetro de los electrodos verticales..	17
1.6.3	El aumento de la distancia entre los electrodos horizontales interiores y disminución de la distancia en los exteriores.....	18
1.6.4	Cambio del Terreno.....	19
1.6.5	Tratamiento químico del suelo.....	20
1.6.6	Utilización de elementos especiales.....	20
1.6.7	Aumento del área de la malla.....	21
CAPÍTULO 2. Análisis de sistemas de puesta a tierra de subestaciones de la región central. 23		
2.1	Características de cada una de las instalaciones.....	24
2.1.1	Grupo electrógeno Fuel Oil Santa Clara 110 kV.....	24
2.1.2	Grupo electrógeno Fuel Oil Santa Clara Industrial.....	24
2.1.3	Grupo electrógeno de Calabazar de Sagua.....	25
2.1.4	Subestación 110/34.5 Calabazar de Sagua.....	26
2.1.5	Subestación 110/34.5 kV Camajuaní.....	27
2.2	Análisis de los potenciales de paso, de contacto y resistencia.....	28
2.2.1	Grupo electrógeno Fuel Oil Santa Clara 110 kV.....	28
2.2.2	Grupo electrógeno Fuel Oil Santa Clara Industrial.....	29
2.2.3	Grupo electrógeno de Calabazar de Sagua.....	31
2.2.4	Subestación 110/34.5 Calabazar de Sagua.....	32

2.2.5	Subestación 110/34.5 kV Camajuani.	33
CAPÍTULO 3. Evaluación de los métodos de reducción de resistencia y potenciales. Propuestas de solución a las subestaciones analizadas.		
3.1	Evaluación de la efectividad de los métodos de reducción de potenciales y resistencia.	35
3.1.1	Aumento del número de electrodos horizontales.	36
3.1.2	Aumento de la longitud de los electrodos verticales.	38
3.1.3	Aumento de la distancia entre los electrodos horizontales interiores y disminución de la distancia en los exteriores.	40
3.1.4	Cambio del terreno existente por otro de menor resistividad.	42
3.1.5	Tratamiento químico y electrolítico del suelo.	42
3.1.6	Utilización de elemento especiales.	43
3.1.7	Aumento del área de la malla.	44
3.2	Análisis económico a las subestaciones analizadas.	46
3.2.1	Grupo electrógeno Fuel Oil Santa Clara 110 kV.	46
3.2.2	Grupo electrógeno Santa Clara Industrial.	48
3.2.3	Grupo electrógeno Calabazar de Sagua.	50
3.3	Propuestas óptimas de mallas a los grupos electrógenos analizados.	52
3.3.1	Propuesta óptima de malla grupo electrógeno Fuel Oil Santa Clara 110kV.	52
3.3.2	Propuesta óptima de malla grupo electrógeno Santa Clara Industrial.	54
3.3.3	Propuesta óptima de malla grupo electrógeno Calabazar de Sagua.	56
3.4	Propuesta a la subestación móvil Camajuaní 110/34.5.	58
3.4.1	Eliminación del montículo de tierra.	58

3.4.2 Ampliación del montículo de tierra.....	61
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	65
Conclusiones	65
Recomendaciones.....	66
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
ANEXOS	69
Anexo I Electrodo vertical en medio artificial.	69
Anexo II Tratamiento de los suelos para disminuir resistencia eléctrica.	70
Anexo III Electrodo artificial.	71

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la humanidad tiene una relación íntima con las instalaciones eléctricas, por lo que es necesario tomar las medidas requeridas para reducir al mínimo los riesgos a que puedan quedar sometidas las personas por un efecto directo o indirecto en estas instalaciones, así como la protección del equipamiento. En condiciones normales de funcionamiento, las fases de la mayoría de los sistemas de generación/transmisión operan en forma aproximadamente simétrica y aislada de tierra, por lo que las corrientes que circulan por el terreno tienen valores muy reducidos, producto solo de pequeños desequilibrios armónicos. Sin embargo; al ocurrir anomalías de origen interno o externo al sistema eléctrico, pueden fluir por la tierra corriente de magnitudes elevadas, dependiendo de la forma en que se conecte el neutro del sistema de transmisión. Por tanto es necesario determinar los riesgos que podrían presentarse y reducirlos a valores que no sobrepasen los tolerables o permitidos.

De esto se encargan las mallas de puesta a tierra siempre y cuando se hayan proyectado bien. También es de interés tener en cuenta, que las mallas con el tiempo de explotación pierden muchas de sus cualidades, debido a diferentes causas como la corrosión de los conductores de la malla, rotura de los conductores por acciones negligentes del hombre lo que influye considerablemente en el aumento de la resistencia de puesta a tierra y de los potenciales de paso y contacto, en ocasiones fuera de lo normado, resultando peligroso para el personal que opera la subestación y los equipos que en esta se encuentran; por lo que en este trabajo se abordará sobre cómo recuperar mallas

de puesta a tierra tomando como objeto de estudio cinco mallas de subestaciones y grupos electrógenos de la región central.

Por lo que se plantean los siguientes objetivos:

Objetivos generales:

Establecer métodos para recuperar mallas de tierra deterioradas, basándose en mallas de la región central fuera de parámetros permitidos por las normas, así como la evaluación de los casos de mallas extremadamente sobredimensionadas que se han ejecutado en el territorio.

Objetivos específicos:

- 1-Realizar una búsqueda bibliográfica sobre el tema “mallas de puesta a tierra en subestaciones”.
- 2-Evaluar con el programa PAST diferentes proyectos de mallas que están fuera de lo normado.
- 3-Proponer mejoras para que las mallas afectadas sigan usándose sin necesidad de remplazarlas por un proyecto nuevo.
- 4- Evaluar los casos más críticos de mallas sobredimensionadas.

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

Sin duda alguna en la actualidad ningún sistema de potencia es aislado de tierra por las ventajas que este presenta sobre los otros. En las instalaciones eléctricas que tienen un sistema de aterramiento, es de gran utilidad para el personal que trabaja en ellas; pues la posibilidad de que en cualquiera de las partes metálicas, accesibles al contacto con las personas, se presenten potenciales respecto a tierra peligrosos, se puede reducir considerablemente, e incluso llegar a eliminarse mediante la puesta a tierra de las mismas, además de servir como descargadoras de corriente de descargas eléctricas altas a tierra (rayos). El valor de la resistencia de la puesta a tierra debe ser lo más pequeño posible a fin de limitar la tensión y para la correcta coordinación de las protecciones. Sin embargo, una puesta a tierra puede presentar un bajo valor de resistencia pero esto no basta, ya que es necesario que se cumpla que el producto de la corriente de falla multiplicado por la impedancia de la puesta a tierra, dé un valor de tensión que no sea peligroso para el hombre y que, además, satisfaga los requerimientos de operación de la instalación.

1.1 Definición de puesta a tierra.

Las definiciones de puesta a tierra varían dependiendo del autor pero sin cambiar la parte esencial de esta, por lo que a continuación se presentan dos de ellas:

“Un conjunto de uno o más electrodos metálicos desnudos, enterrados en el terreno e interconectados eléctricamente entre sí, cuyo objetivo principal es

proporcional 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].

“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”.

1.2 Objetivos de puesta a tierra.

Los objetivos de una puesta a tierra varían en dependencia de la finalidad que se le desea dar a la malla. Su objetivo principal es garantizar la seguridad de las personas que laboran o transitan por la instalación y cumplir con los requerimientos técnicos por la parte eléctrica, para hacer la subestación fiable y protegida ante todo. Desde el punto de vista del comportamiento técnico de un sistema eléctrico, una puesta a tierra cumple diversas funciones, algunas de las cuales, según sea el caso, son exclusivas o tienen prioridad [1] [12] [14] [11].

1-Contribuir a reducir los valores de sobrevoltaje que pueden aparecer en condiciones anormales de operación en los sistemas de transmisión [4] [5].

De acuerdo con su origen y duración, los sobrevoltajes que se producen en un sistema de transmisión, pueden ser de la siguiente naturaleza:

- Rechazos de cargas de unidades generadoras.
- Efecto Ferranti en líneas largas.
- Autoexcitación de generadores.
- Fallas a tierras en los sistemas de transmisión.
- Sobrevoltaje de origen externo (rayos).
- Sobrevoltaje de origen interno (maniobras de conexión y desconexiones equipos).

2- Proporcionar una vía de baja resistencia (impedancia) para lograr la operación correcta de los elementos de protección (relés, fusibles, etc.) de las líneas de los sistemas de transmisión [8].

Un alto porcentaje de las fallas residuales que se producen en las líneas y subestaciones se deben a la rotura o contaminación de los aisladores, afectando normalmente a una sola fase. Cuando se produce una falla en una línea de transmisión, la corriente residual circula hacia tierra a través del camino establecido por el arco producido, cruceta o soporte metálico del aislador, conductor de bajada a tierra (para postes de madera u hormigón) y puesta a tierra correspondiente.

3-Conducir de forma eficiente hacia tierra las descargas atmosféricas, limitando las diferencias de potencial que pudieran presentarse en la instalación [2].

Un ejemplo de este requerimiento es cuando una estructura de una línea de transmisión es sometida a una descarga atmosférica. Dependiendo, entre otros, de la magnitud de la corriente de descarga y de las impedancias de impulso de las puestas a tierra y estructura, esta última puede adquirir un potencial tal que ocasione un arco inverso (“back-flashover”), hacia uno o más conductores de fase, los cuales poseen un potencial diferente.

1.3 Clasificación de la puesta a tierra.

A la puesta a tierra que tiene como objetivo principal, reducir al mínimo los riesgos a la seguridad de las personas, y también de los equipos, se acostumbra denominarla [19]:

- **Puesta a tierra de protección** (equipment earthing): De acuerdo a esta definición, a ella se le conectan conductivamente los elementos metálicos expuestos de una instalación, entendiéndose por éstos, aquellos elementos conductores, normalmente sin tensión (carcasas, cubículos, tuberías, etc.), pero que pueden eventualmente adquirir un potencial con respecto a puntos del terreno o con respecto a otros objetos metálicos expuestos, al

producirse una falla en la instalación [3] [6].

- **Puesta a tierra de servicio** (sistema earthing): 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 o a las tensiones inducidas por sistemas energizados cercanos [12].
- **Puesta a tierra de operación:** tiene como objetivo prioritario el ser el punto de unión a tierra de partes activas de un sistema de transmisión (neutros de transformadores de potencia etc.)

1.4 Requisitos de una malla de tierra.

Dependiendo del objetivo para el cual se diseñe la malla, estas se pueden dividir por requisitos [5] [19]:

- ❖ **Requisitos de proyecto:** establece las características generales de la puesta a tierra, para que cumpla con los objetivos fundamentales perseguidos, donde sus requisitos 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.

- ❖ **Requisitos de diseño:** características que deben poseer los constituyentes de la malla, para que sea efectiva, duradera, soporte las sollicitaciones máximas (mecánicas y eléctricas) a que pueden ser sometidas, donde sus requisitos 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) [10].
 - 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 usarán 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.
 - 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.

1.5 Aspectos esenciales a tener en cuenta en 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.

1.5.1 Tensión permisible de paso.

Podemos definir objetivamente a la tensión de paso como la máxima diferencia de potencial entre los puntos que están haciendo contacto los dos pies de una persona, con una separación de un metro, que se encuentra caminando en el área de la subestación al ocurrir una falla de fase a tierra(figura1.1) [9] [18] [19].

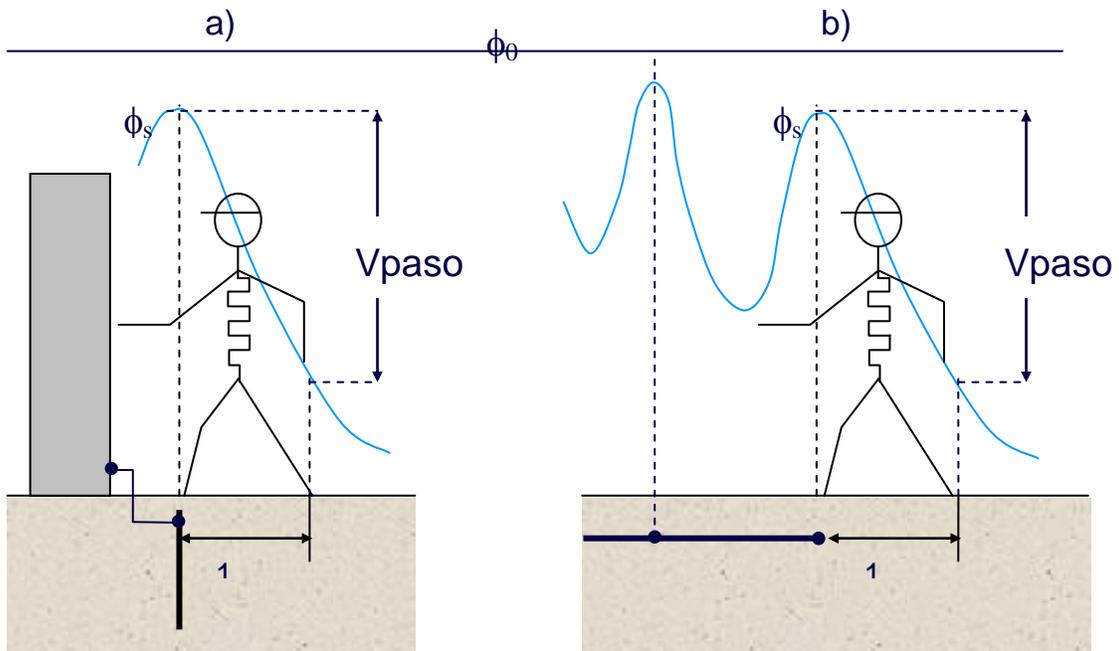


Figura1.1 Tensión de paso.

1.5.2 Tensión permisible de contacto.

Podemos definir la tensión de contacto como la máxima diferencia de potencial entre el punto de contacto de los pies de una persona que se encuentra parada en el área de la subestación y el punto de contacto de una o de sus dos manos al tocar una estructura metálica cuando ocurre una falla de fase a tierra (figura 1.2) [9] [18] [19].

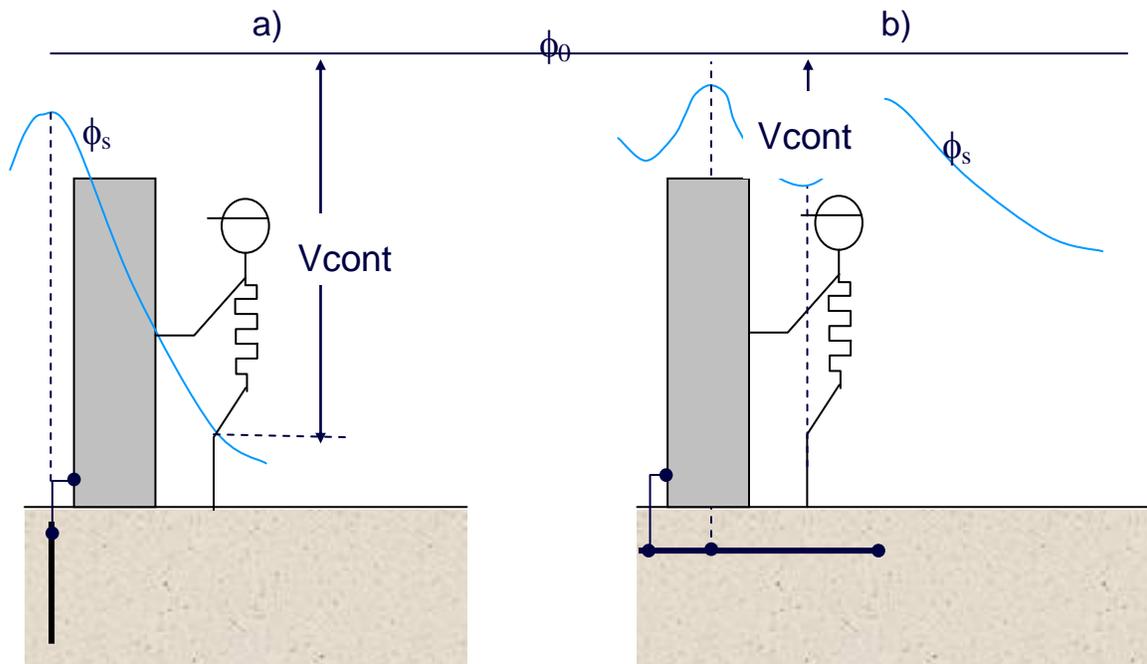


Figura 1.2 Tensión de contacto.

1.5.3 Configuración de la malla.

Una puesta a tierra puede tener como requisito único el poseer un determinado valor máximo de resistencia. En este caso, la solución más adecuada es utilizar un electrodo o un conjunto de electrodos, que signifique un costo mínimo. La decisión entre diferentes opciones dependerá en gran medida de la disponibilidad de terreno, características mecánicas de este, posibilidad de utilizar métodos especiales, etc. Para puestas a tierras que sirven a instalaciones que cubren un área determinada, la solución básica puede ser el construir una puesta a tierra constituida por un rectángulo periférico, que tenga como máximo el valor de resistencia establecido. Sin embargo, es posible que la solución empleada con el objetivo de cumplir solo con el valor máximo de resistencia establecido, no satisfaga el requerimiento de seguridad para las personas y equipos dentro o en los contornos de la instalación, debido a la existencia de solicitaciones de voltaje superiores a lo tolerable. De ser así, es necesario agrupar los electrodos de una forma tal que se cumpla, además, con este segundo objetivo, dando a la puesta a

tierra una geometría conveniente [5].

1.5.4 Resistividad del terreno.

La resistividad del terreno es el factor determinante en la magnitud de la resistencia de una puesta a tierra y la misma depende de:

- Tipo de terreno.
- Humedad del terreno.
- Salinidad del terreno.
- Temperatura del terreno.
- Granulometría del terreno.
- Compacticidad del terreno.
- Estratografía.
- Otros factores.

Tipo de terreno: La variación de la resistividad según la composición del terreno es muy grande, tropezándose con la dificultad de que los diferentes tipos de terreno no están delimitados como para saber, de antemano, el valor de la resistividad en el punto elegido para efectuar la puesta a tierra. Sucede, incluso, que para una misma clase de terreno, situado en distintos lugares, la resistividad puede ser sensiblemente diferente [16] [12] [17].

Humedad del terreno: Otro factor de importancia en el valor y estabilidad de la resistencia de una puesta a tierra es la cantidad de agua contenida en el terreno y las variaciones de ésta a lo largo de las estaciones (figura 1.3), ya que una pequeña variación en el porcentaje de humedad contenida puede producir una variación apreciable en la resistencia de la puesta a tierra. En general se puede plantear que a medida que el grado de humedad aumenta, cuyo principal efecto es disolver las sales contenidas en el terreno, la resistencia disminuye con rapidez, pero a partir de cifras del orden del 15% en peso, esta disminución es mucho menos acusada a causa de que se alcanza prácticamente la saturación del terreno [12] [17].

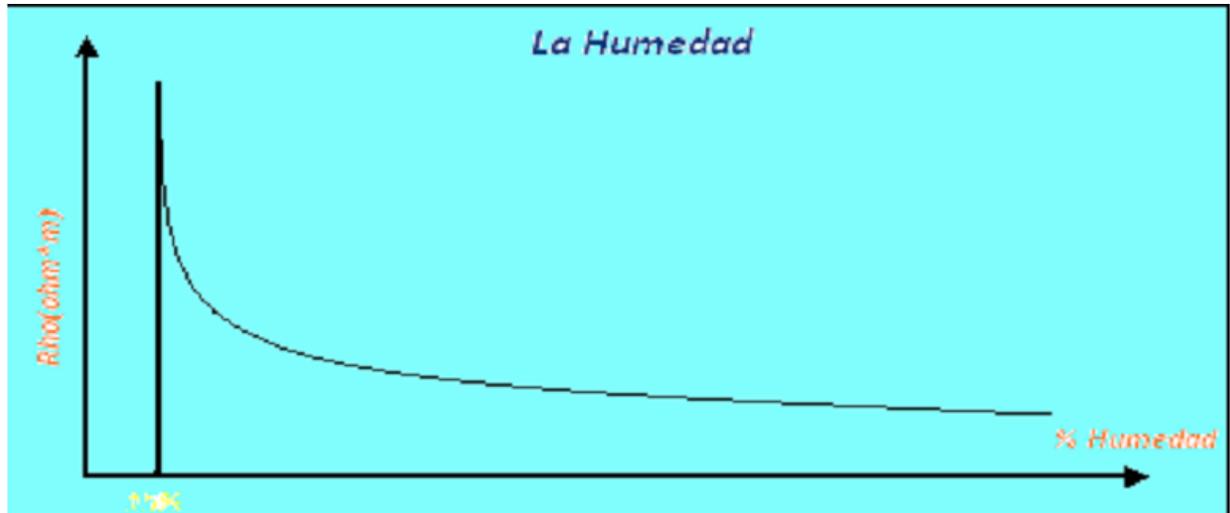


Figura1.3 Variación de la resistividad en función del porcentaje de humedad.

Salinidad del terreno: La resistividad del terreno depende de su composición química, lo que determina la cantidad de sales disueltas en el agua que él contiene. Una pequeña cantidad de sal disuelta puede reducir la resistividad considerablemente, lo que explica porque suelos similares, para diferentes localidades, tienen diferentes resistividades.

Así se tiene que para terrenos de alta resistividad, en los cuales es necesario bajar la resistencia de una puesta a tierra, se obtienen buenos resultados si en lugar de electrodos verticales convencionales se usan tubos galvanizados horadados, los que periódicamente se llenan de una solución salina. Las sales más comunes son: la sal común, el cloruro de calcio, el sulfato de cobre, el sulfato de magnesio, etc.

Temperatura del terreno: La resistividad del terreno asciende a medida que descende la temperatura y ese efecto se acentúa al alcanzarse los 0 °C hasta el punto que, a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrolitos lo que influye directamente en la resistividad del terreno, elevándose ostensiblemente la misma (figura 1.4) [10].

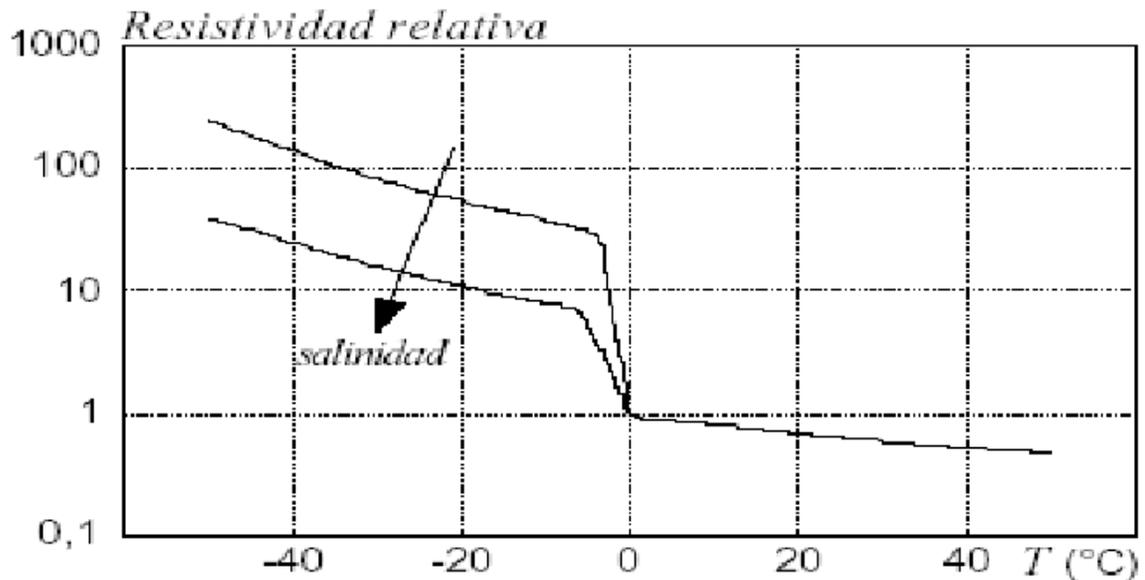


Figura 1.4 Variación relativa de la resistividad con la temperatura.

Para valores de temperatura superiores a la temperatura de congelación el efecto es menos apreciable, aunque entre algunos grados y 25 °C puede llegar a reducirse a la mitad [11].

Granulometría: Es un elemento importante que influye, a la vez, sobre la porosidad y el poder de retener la humedad y también sobre la calidad del contacto con los electrodos, incrementándose la resistividad con el tamaño de los granos. Esta es la razón por la que el valor de la resistividad de la grava sea superior a la de la arena y la de esta superior a la de la arcilla.

Los suelos de granos gruesos se prestan mal al establecimiento de buenas redes de tierra, circunstancia que se puede paliar rodeando la superficie de los electrodos de un cierto espesor de tierra fina o de otro material más conductor [12] [17] [16].

Compacticidad: La resistividad se ve afectada por el grado de compacticidad del terreno disminuyendo al aumentar ésta. Por esta razón es que cuando se efectúa un movimiento de tierra, si ésta no se compacta artificialmente, la resistividad del terreno irá disminuyendo con el tiempo y no es hasta aproximadamente dos años después que no alcanza su valor estable [12] [17] [16].

Estratografía: La resistividad de un terreno es la correspondiente a la resultante de las diversas capas de que está constituido. Puede suceder que una sola capa presente una resistividad tan baja que la influencia de las demás sea imperceptible, tal como ocurre cuando se alcanza las zonas de humedad permanente o el manto freático [12] [17] [16].

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

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

1.5.5 Tiempo de duración del transitorio.

El tiempo durante el cual una persona o equipo pueden quedar eventualmente sometidos a una sollicitación eléctrica en una instalación, es el tiempo que perdura la condición anormal o de falla que provoca la circulación de corrientes hacia el terreno. Este tiempo depende en gran medida de la prontitud con que actúan las protecciones de las componentes del sistema [7].

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 uno a cuatro reconexiones, que se realizan 0.1 a 0.5 seg 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 solicitudes consecutivas con tiempos relativamente cortos entre ellas. Por tanto, es recomendable considerar como tiempo total de la solicitud, la suma de los tiempos parciales de duración de cada falla.

1.5.6 Conductor de la malla.

Cada uno de los elementos del sistema de tierra incluyendo los conductores de la red, los cables de puesta a tierra de los equipos o estructuras y los electrodos, deben ser seleccionados de tal manera que presenten las siguientes características:

- Tengan la suficiente conductividad para que no contribuyan substancialmente a producir diferencias de potenciales locales.
- Resistencia a la fusión y deterioro en las condiciones más desfavorables de magnitud y tiempo de duración de corriente de falla a que pueden quedar expuestas.
- Confiables y con alta resistencia mecánica, especialmente en aquellos lugares en que pueden quedar expuestos a un daño o abuso físico.

Sean capaces de mantener sus características aun cuando sean expuestas a la corrosión [20].

1.5.7 Profundidad de enterramiento de los electrodos de la malla.

Este efecto proporciona sólo una reducción marginal en la impedancia, pero a un costo relativamente alto. Debe recordarse sin embargo, que mientras mayor sea la profundidad de enterramiento, menores son los gradientes de voltaje en la superficie del suelo. En el interior de una subestación, se requiere un voltaje alto sobre la posición del electrodo para minimizar los voltajes de contacto. Sin embargo, si un electrodo de tierra se extiende fuera de la subestación, entonces se requiere un voltaje bajo en la superficie del suelo para reducir los potenciales de paso.

1.6 Métodos para reducir la resistencia de puesta a tierra y potenciales de paso y de contacto.

Existen distintos métodos para lograr la reducción de la resistencia eléctrica, aunque todos ellos presentan un punto de saturación que es conveniente conocer para evitar diseños antieconómicos. Los métodos para la reducción son los siguientes:

- El aumento del número de electrodos en paralelo
- El aumento de la longitud y el diámetro de los electrodos
- El aumento de la distancia entre los electrodos horizontales interiores y disminución de esta distancia en los exteriores.
- El cambio del terreno existente por otro de menor resistividad.
- El tratamiento químico electrolítico del terreno.
- Utilización de elementos especiales.
- Aumento del área de la malla

1.6.1 El aumento del número de electrodos horizontales en paralelo.

La acción de aumentar el número de electrodos conectados en paralelo disminuye el valor de la "Resistencia Equivalente", pero esta reducción no es lineal puesto que la curva de reducción tiene tendencia asintótica al 70 % de la resistencia de la malla perimétrica. El factor determinante de la resistencia de puesta a tierra de los electrodos horizontales es su longitud tal como se muestra en la figura 1.5 [7].

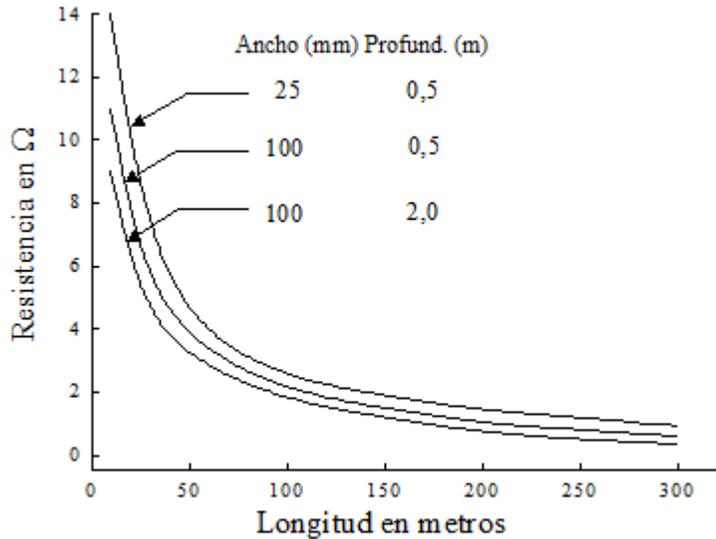


Figura 1.5 Variación de la resistencia de puesta a tierra con respecto a la longitud.

1.6.2 El aumento de la longitud y el diámetro de los electrodos verticales.

Al aumentar la longitud del electrodo hincado en la tierra la resistencia primero disminuye bruscamente y después lo hace suavemente, lo que está determinado por el hecho de que al aumentar la profundidad del enterramiento la humedad del terreno se va estabilizando y con ello el valor de su resistividad (figura 1.6). Además, se puede observar que a medida que aumenta la profundidad del electrodo la dependencia de la resistencia del radio del electrodo disminuye.

La experiencia indica que la estabilización de la resistencia se logra para electrodos verticales hincados a una profundidad entre los 1.4 - 2.4 m, pues para estos valores la disminución de la resistencia es muy pequeña cuando se aumenta la profundidad. Analizando estos aspectos se llega a la conclusión de que para obtener el valor mínimo de resistencia con un electrodo de varilla es necesario enterrarlo 2.4 -3 m, pero en la práctica lo más usual es 1.8 m, ya que electrodos de varilla de mayor longitud necesitan métodos especiales para enterrarlos, lo que aumenta considerablemente el costo de la instalación. Claro está que en el caso de las subestaciones se justifica la utilización de electrodos con longitudes superiores a los 4.5 m (por regla general se emplean vigas y tuberías de gran diámetro), llegándose el caso de perforar pozos de puesta a tierra.

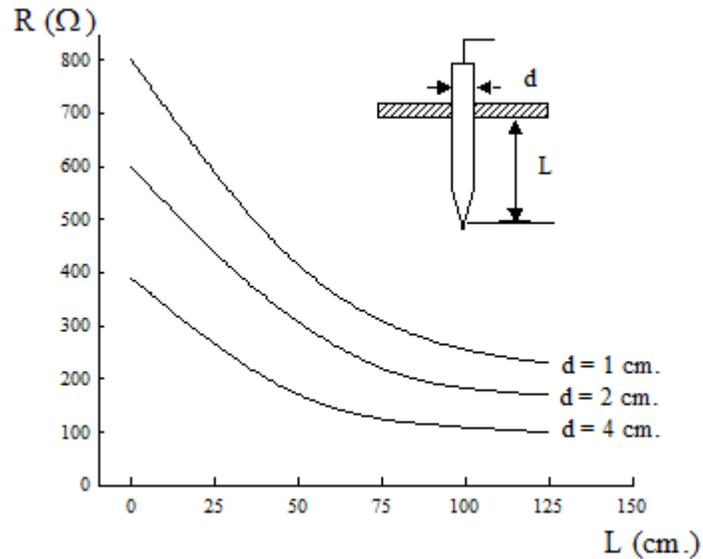


Figura 1.6 Dependencia de la resistencia de puesta a tierra de un electrodo vertical de su diámetro y su longitud.

Al aumentar el diámetro de los electrodos la resistencia de puesta a tierra disminuye, pero a partir de un diámetro de unos 20 mm la variación de la misma no es significativa. Con la finalidad de disminuir la resistencia de puesta a tierra de un electrodo vertical se puede situar el mismo en un medio artificial (anexo I), para lo cual se hace un hueco en el centro del cual va el electrodo y el resto se rellena de un material de más baja resistividad que la tierra circundante.

1.6.3 El aumento de la distancia entre los electrodos horizontales interiores y disminución de la distancia en los exteriores.

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 [10].

Normalmente la distancia entre ejes de los electrodos debe ser $\geq 4L$ siendo L la longitud del electrodo; pero en los casos donde se requiera obtener resistencias eléctricas muy bajas y exista disponibilidad de área de terreno, las distancias entre

ejes de los electrodos, deberán ser lo máximo posible; pues a mayor distancia entre ejes de electrodos, mayor será la reducción de la resistencia a obtener; y ello por el fenómeno de la resistencia mutua entre electrodos [11] [7].

1.6.4 Cambio del Terreno.

Los terrenos pueden ser cambiados en su totalidad, por terreno rico en sales naturales; cuando ellos son rocosos, pedregosos, calizas, granito, que son terrenos de muy alta resistividad y pueden cambiarse parcialmente cuando el terreno está conformado por componentes de alta y baja resistividad; de modo que se supriman las partes de alta resistividad y se reemplacen por otros de baja resistividad; uno de estos procedimientos es el zarandeo del terreno donde se desechan las piedras contenidas en el terreno. El cambio total parcial del terreno deberá ser lo suficiente para que el electrodo tenga un radio de buen terreno que sea de 0 a 0.50 m en todo su contorno así como en su fondo. La resistencia crítica de un electrodo se encuentra en un radio contorno que va de 0 a 0.5 m de este, por lo que se tendrá sumo cuidado con las dimensiones de los pozos para los electrodos proyectados. El porcentaje de reducción en estos casos es difícil de deducir, debido a los factores que intervienen, como son resistividad del terreno natural, resistividad del terreno de reemplazo total o parcial, adherencia por la compactación y limpieza del electrodo, pero se da una idea porcentual más menos en función al tipo de terreno y al cambio total o parcial. Para lugares de alta resistividad donde se cambie el terreno de los pozos en forma total, el porcentaje puede estar entre 50 a 70 % de reducción de la resistencia eléctrica resultante. Para terrenos de media resistividad donde se cambie el terreno de los pozos en forma parcial o total, el porcentaje de reducción puede estar como sigue:

- Cambio parcial de 20 a 40 % de reducción de la resistencia eléctrica resultante.
- Cambio total de 40 a 60 % de reducción de la resistencia eléctrica resultante.

Para terrenos de baja resistividad donde se cambiará el terreno de los pozos en forma parcial, el porcentaje de reducción puede estar entre 20 a 40 % de la resistividad natural del terreno.

1.6.5 Tratamiento químico del suelo.

El tratamiento químico del suelo surge como un medio de mejorar y disminuir la resistencia eléctrica de la malla sin necesidad de utilizar gran cantidad de electrodos (anexo II y III). Para elegir el tratamiento químico de una malla se deben considerar los siguientes factores:

- Alto porcentaje de reducción inicial.
- Facilidad para su aplicación.
- Tiempo de vida útil (del tratamiento y de los elementos de la malla)
- Facilidad en su reactivación
- Estabilidad (mantener la misma resistencia durante varios años)

Las sustancias que se usan para un eficiente tratamiento químico deben tener las siguientes características:

Higroscopicidad, alta capacidad de gelificación, no ser corrosivas, alta conductividad eléctrica, químicamente estable en el suelo, no ser tóxico e inocuo para la naturaleza.

1.6.6 Utilización de elementos especiales.

Es posible reducir las solicitaciones de voltaje que se producen en los módulos esquina de una malla de tierra instalando elementos adicionales en estos. En mallas con un número grande de módulos, el más utilizado consiste en agregar conductores que dividan en dos o cuatro partes los módulos esquina.

Si tanto la malla como los módulos tienen una forma alargada, es probable que sea suficiente instalar elementos que dividan en dos partes los módulos esquina. Sin embargo, considerando el relativamente poco conductor adicional, se acostumbra instalar cruces. Al agregar cruces se reduce en una magnitud importante la solicitación en los módulos esquinas (figura 1.7). También se reduce,

aunque en menor magnitud, la sollicitación en los otros módulos de la malla. El valor máximo de sollicitación se traslada al módulo contiguo ubicado sobre la periferia [11].

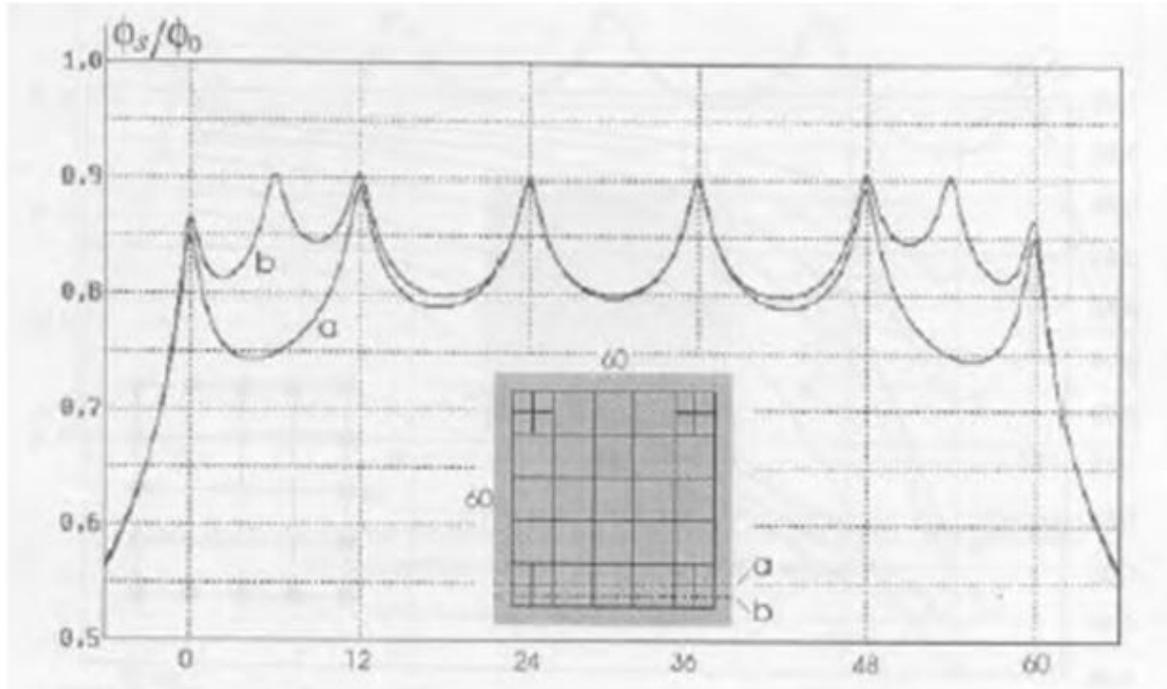


Figura 1.7 Efecto en los módulos esquina a) Antes de agregar conductores en cruz. b) Después de agregar conductores en cruz.

1.6.7 Aumento del área de la malla.

Este es un método muy efectivo para reducir la resistencia de la malla, pero tiene en contra el factor espacio. En la figura 1.8 se muestra el beneficio que puede obtenerse en suelos de diferente resistividad incrementando el área abarcada por un electrodo cuadrado. A pesar de que el mejoramiento por unidad de área disminuye, la reducción en resistencia resulta aún significativa. En realidad ésta es frecuentemente la forma más efectiva para reducir la resistencia de puesta a tierra total de una malla [10] [7].

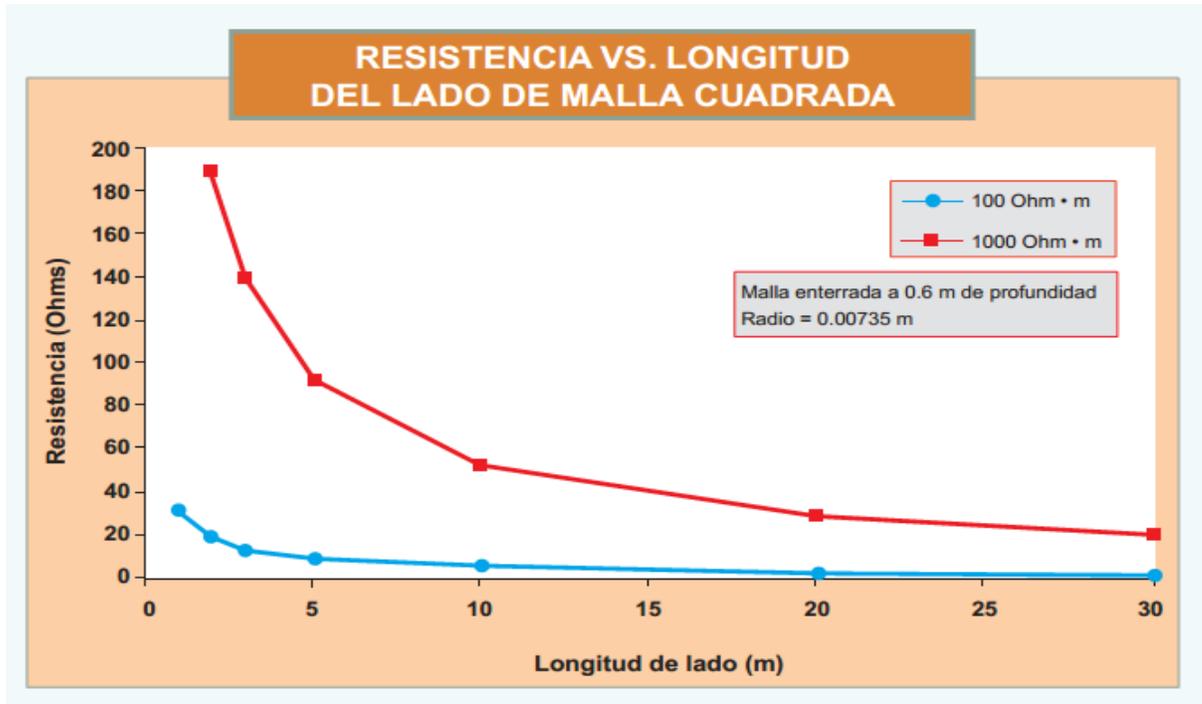


Figura 1.8 Efecto de la resistividad con el aumento del area.

CAPÍTULO 2. Análisis de sistemas de puesta a tierra de subestaciones de la región central.

Las subestaciones que se construyen en la actualidad en su mayoría están sobredimensionadas por no realizarse las mediciones que conlleva un proyecto de este tipo y se estandarizan, gastando en su construcción sumas de dinero considerablemente por encima de lo que se gastaría en un proyecto bien concebido e incluso quedando fuera de los valores permisibles en cuanto a potenciales de paso y contacto; resultando peligroso para el personal que opera la subestación. Por otra parte subestaciones con mucho tiempo de explotación presentan problemas en cuanto a potenciales y resistencia, resultando peligroso para el personal y provoca un mal funcionamiento de las protecciones.

En este capítulo se realizará el análisis de subestaciones y emplazamientos de grupos electrógenos de diferentes niveles de voltaje, con el objetivo de analizar su estado actual en cuanto a resistencia, potenciales de paso y de contacto y plantear soluciones de cómo mejorar estos parámetros.

2.1 Características de cada una de las instalaciones.

2.1.1 Grupo electrógeno Fuel Oil Santa Clara 110 kV.

El sistema de tierra de la batería de Santa Clara 110 kV está formado por un reticulado de lado mayor 168.0m y lado menor 102.0m para un área de la malla de 17136.0m² como se muestra en la figura 2.1. Este reticulado está constituido por cable trenzado de cobre electrolítico desnudo de sección 4/0 AWG (107.22mm² y 13.3mm de diámetro exterior) (cable horizontal), a una profundidad de 1.0m con respecto al nivel del terreno. Se conectaron 195 electrodos verticales a lo largo y dentro del perímetro de la malla con un diámetro de 16mm y 2m de longitud cada uno. Esta malla de tierra (conductores horizontales y electrodos verticales) ocupa un área total que se extiende 1m por fuera de la cerca perimetral y las cuadrículas son formadas por el conductor conectado con soldadura exotérmica.

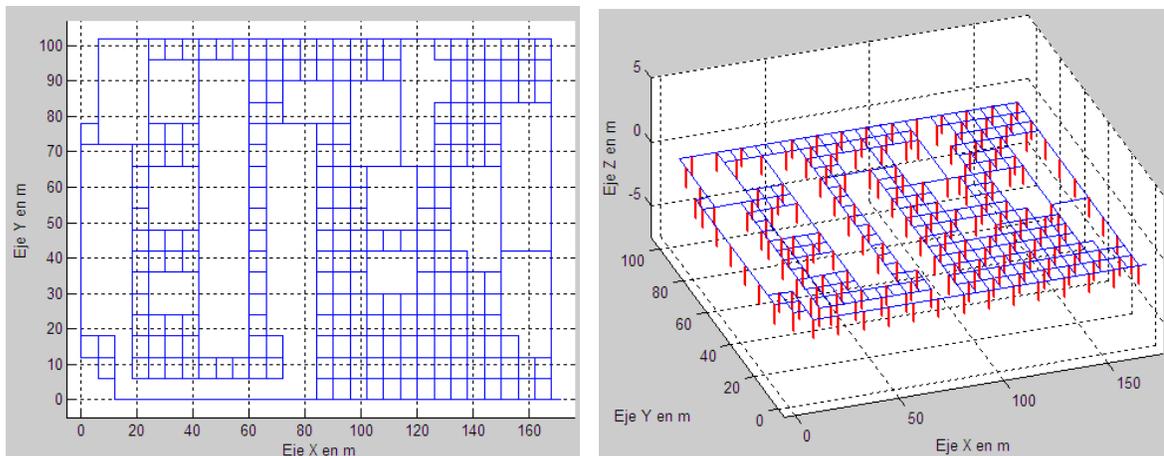


Figura 2.1 Configuración de electrodos del grupo electrógeno Fuel Oil Santa Clara 110 kV.

Esta batería presenta 427.79 MVA de cortocircuito monofásico para una corriente de falla monofásica de 7158.0A y 479.63MVA de cortocircuito trifásico para una corriente de falla de 7158.0A.

2.1.2 Grupo electrógeno Fuel Oil Santa Clara Industrial.

El sistema de tierra de la batería de Santa Clara Industrial está formado por un reticulado de lado mayor 210.0m y lado menor 102.0m para un área de la malla de

21420.0m² como se muestra en la figura 2.2. Este reticulado está constituido por cable trenzado de cobre electrolítico desnudo de sección 4/0 AWG (107.22mm² y 13.3mm de diámetro exterior) (cable horizontal), a una profundidad de 1.0m con respecto al nivel del terreno. Se conectaron 269 electrodos verticales a lo largo y dentro del perímetro de la malla con un diámetro de 16mm y 2m de longitud. Esta malla de tierra (conductores horizontales y electrodos verticales) ocupará un área total que se extenderá 1m por fuera de la cerca perimetral y las cuadrículas son formadas por el conductor conectado con soldadura exotérmica. Esta batería presenta 271.66 MVA de cortocircuito monofásico para una corriente de falla monofásica de 4545.0A y 308.63MVA de cortocircuito trifásico para una corriente de falla de 5165.0A.

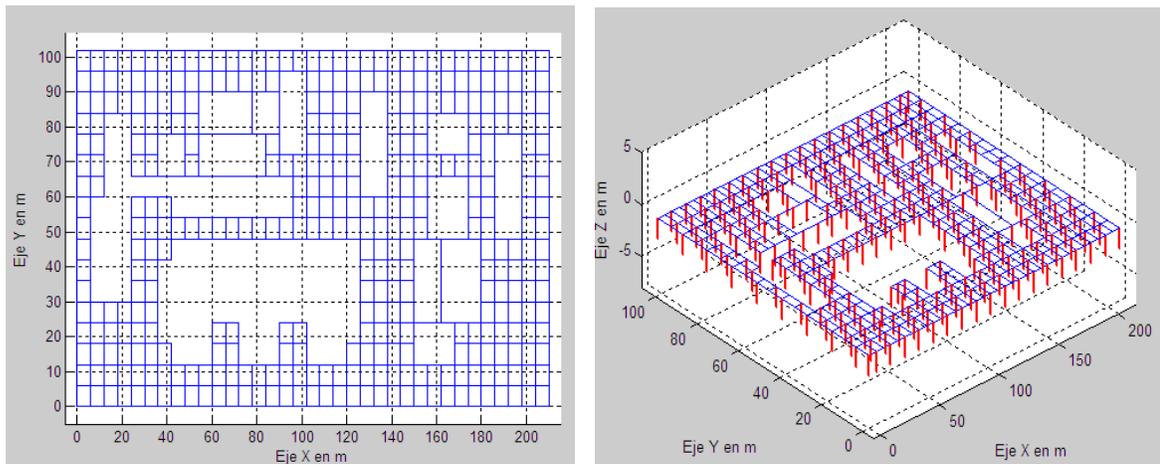


Figura 2.2 Configuración de electrodos del grupo electrógeno Santa Clara Industrial.

2.1.3 Grupo electrógeno de Calabazar de Sagua.

El sistema de tierra de la Batería de Calabazar de Sagua está formado por un reticulado de lado mayor 186 m y lado menor 96 m para un área de la malla de 17856 m², como se muestra en la figura 2.4. El reticulado está formado por cable de cobre 4/0 AWG, a una profundidad de un m con respecto al nivel del terreno. Se conectaron 230 electrodos verticales a lo largo y dentro del perímetro de la malla. El cable del reticulado es desnudo, de cobre electrolítico (19 hilos) de sección 107.20 y los electrodos de acero de diámetro 16mm y de tres m de

longitud. Esta subestación presenta 259.04 MVA de cortocircuito monofásico para una corriente de falla monofásica de 4334.9 A y 223.15 MVA de cortocircuito trifásico para una corriente de falla trifásica de 3734.3 A.

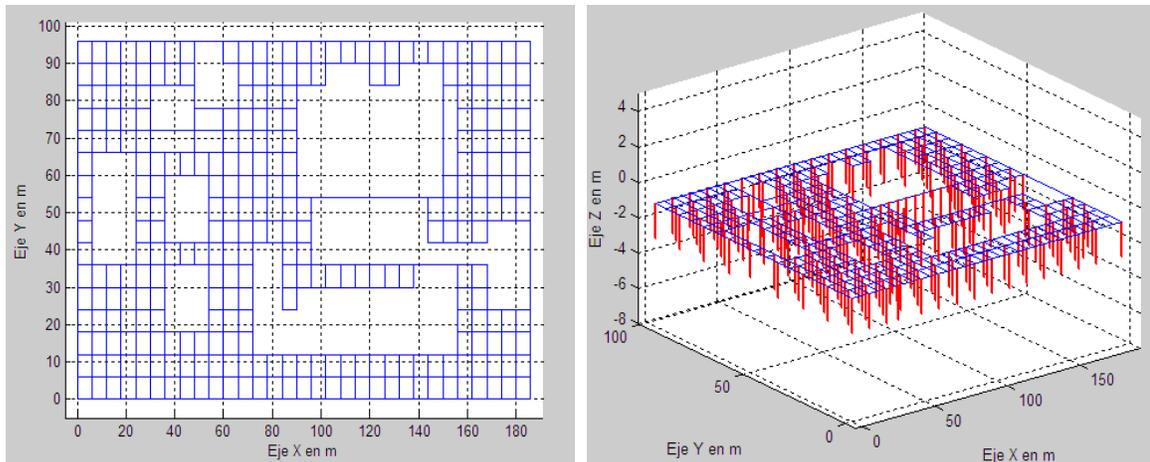


Figura 2.4 Configuración de electrodos de la malla de tierra del grupo electrógeno Fuel Oil Calabazar.

2.1.4 Subestación 110/34.5 Calabazar de Sagua.

El sistema de puesta tierra de la subestación Calabazar de Sagua 110/34.5kV, es un proyecto típico y está formado por un reticulado de lado mayor 84 m y lado menor 70 m para un área de la malla de 5880m², como se muestra en la figura 2.3. Está constituido por cable de cobre a una profundidad de 0.8m con respecto al nivel del terreno. Se conectaron 11 electrodos verticales puntualmente dentro del perímetro de la malla y 10 electrodos verticales más por el perímetro de la subestación con longitud de 2.44m cada uno para aterrizar la cerca. Los 16 conductores horizontales que conforman el reticulado no están separados equidistantemente para una longitud total del conductor de 872.0m. El cable del reticulado es desnudo, de cobre electrolítico (19 hilos) de sección 4/0 AWG (107.22mm² y 13.3mm de diámetro exterior) y los electrodos de acero cobrizado (tipo copperweld) de diámetro 16mm y de 2.44m (8') de longitud. Esta subestación presenta 263.99MVA de cortocircuito monofásico para una corriente de falla monofásica de 4212.0A y 215.11MVA de cortocircuito trifásico para una corriente de falla trifásica de 3534.

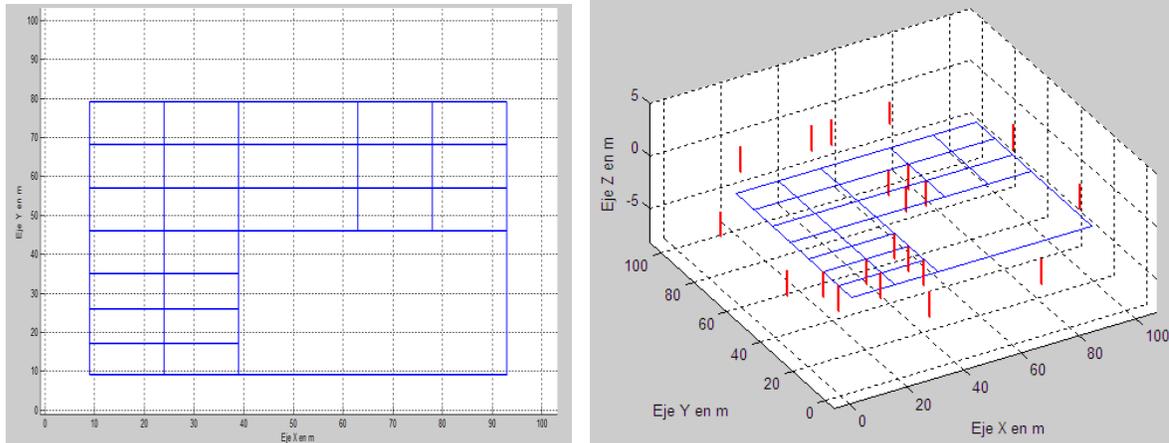


Figura 2.3 Configuración de electrodos de la malla de tierra de la subestación Calabazar 110kV.

2.1.5 Subestación 110/34.5 kV Camajuani.

La subestación móvil de Camajuani es un proyecto estándar de 64m de lado mayor y 26.96m el lado menor para un área del reticulado de 1725.44m² (figura 2.5), se construyó con cable del tipo 4/0 AWG a 1 m de profundidad con respecto al nivel del suelo.

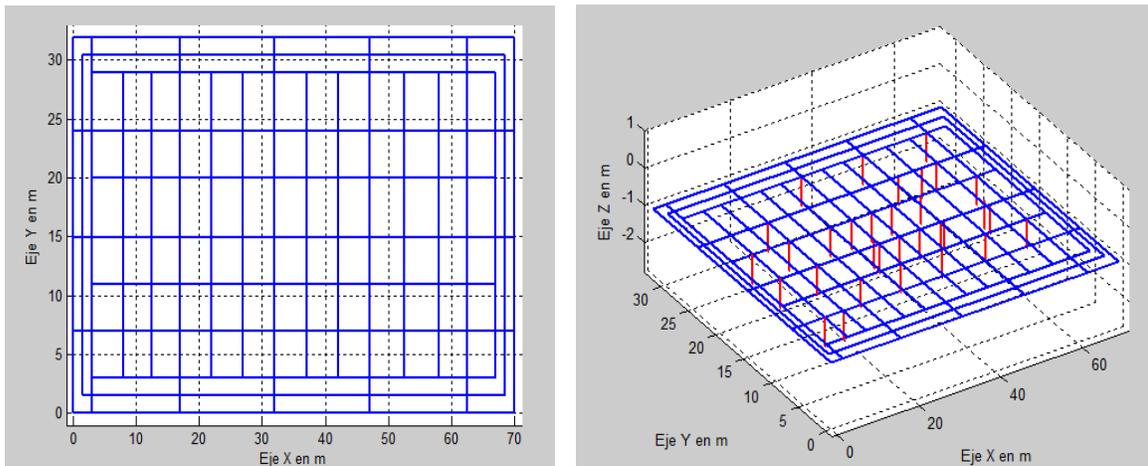


Figura 2.5 Configuración de electrodos de la malla de tierra Camajuani.

2.2 Análisis de los potenciales de paso, de contacto y resistencia.

Para el análisis de los potenciales de paso, de contacto y resistencia se utilizó el programa PAST para cada una de las subestaciones anteriores. Se utilizaron mediciones de resistividad de estudios hechos por la empresa eléctrica.

2.2.1 Grupo electrógeno Fuel Oil Santa Clara 110 kV.

Se puede observar en la figura 2.6 que la tensión de contacto (175.52 V) está muy por debajo de la tención permisible (1490.8 V), debido a la gran cantidad de electrodos presente en la malla de esta batería; lo que demuestra que está extremadamente sobrediseñada.

La tensión de paso (21.52 V) está muy por debajo de la permisible por el cuerpo humano (4473.77 V) no presentando problema para la vida humana (figura 2.7).

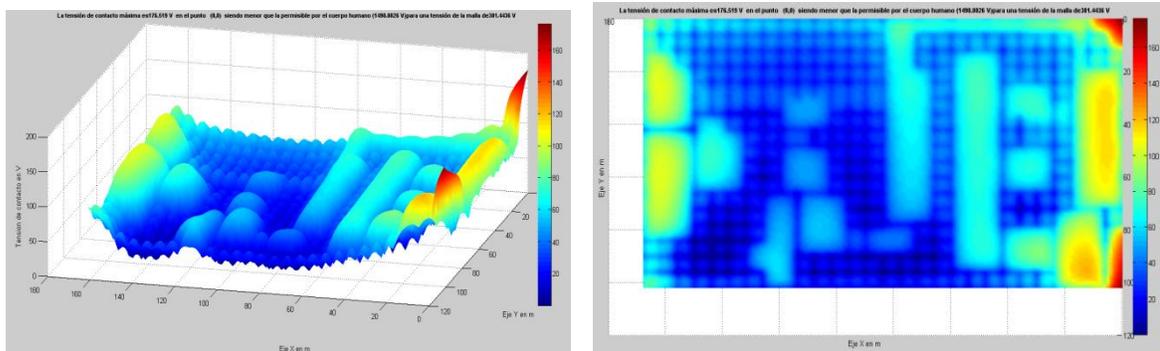


Figura 2.6 Potencial de contacto. (Máximo 175.52 V y permisible 1490.8 V).

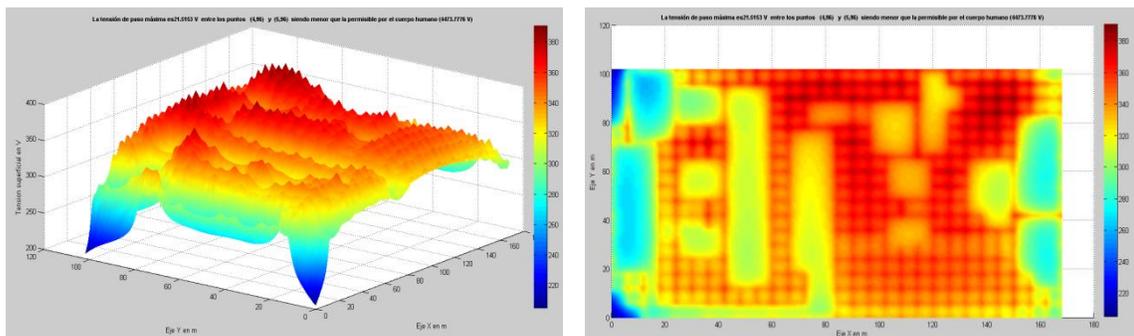


Figura 2.7 Potencial de paso. (Máximo 21.52 V y permisible 4473.77 V).

Como se puede observar en la figura 2.8, la resistencia está muy por debajo del valor normado (1Ω) por el sobredimensionamiento antes mencionado de esta malla.

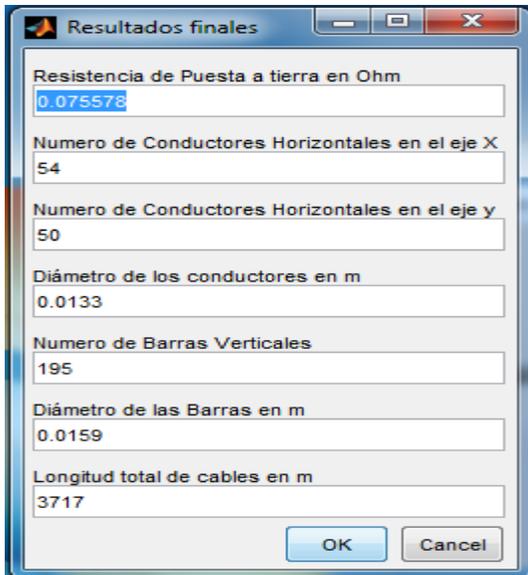


Figura 2.8 Resistencia de la malla.

2.2.2 Grupo electrógeno Fuel Oil Santa Clara Industrial.

La tensión de contacto (54.35 V) está muy por debajo de la permisible por el cuerpo humano (1975.74 V) pues esta malla está extremadamente sobredimensionada debido a que no se realizaron las mediciones correspondientes y se usó un modelo típico (figura 2.9).

La tensión de paso (8.01 V) está muy por debajo de la permisible por el cuerpo humano (6413.5 V) no presentando problema para la vida humana (figura 2.10).

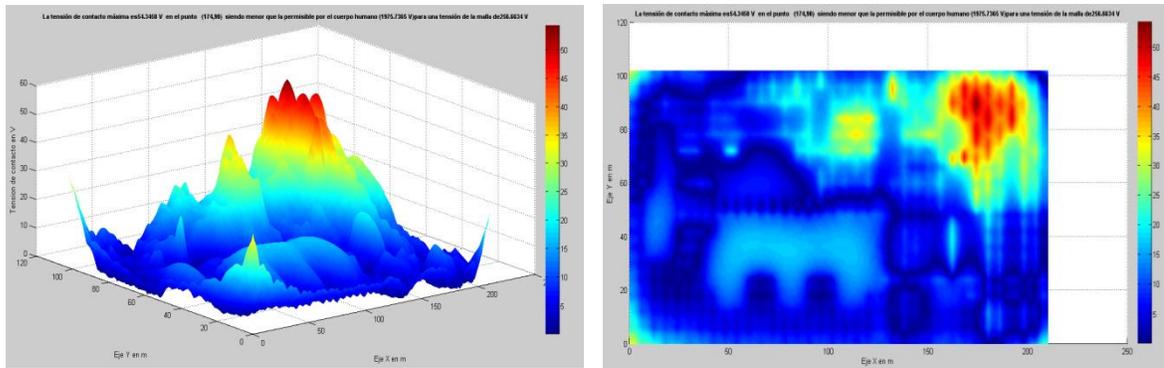


Figura 2.9 Potencial de contacto (Máximo 54.35 V y permisible 1975.74 V).

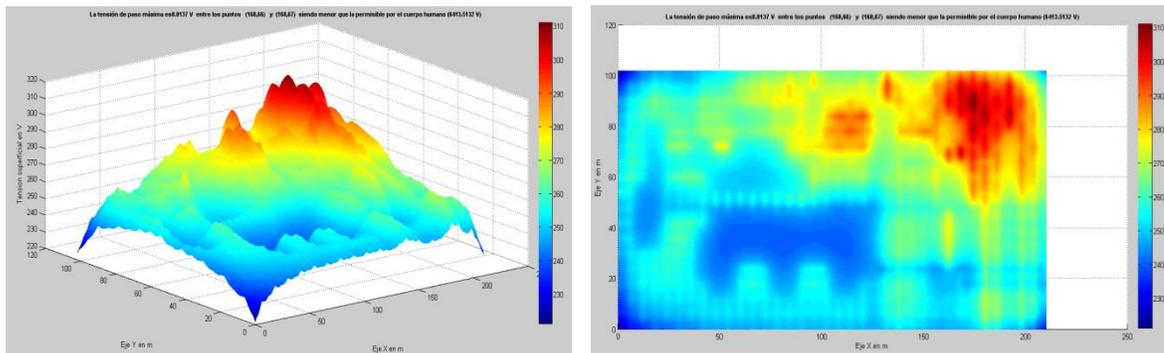


Figura 2.10 Potencial de paso (Máximo 8.01 V y permisible 6413.5 V)

En la figura 2.11 se muestran los resultados de la resistencia obtenidos al correr esta malla, siendo un valor bajo por el sobredimensionamiento y dentro de lo normado.

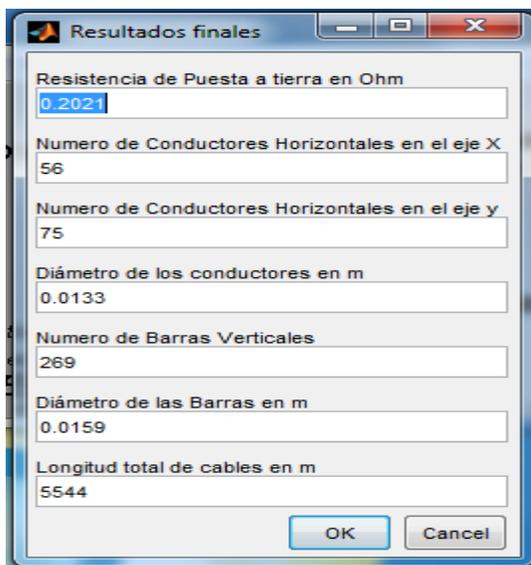


Figura 2.11 Resistencia de la malla.

2.2.3 Grupo electrógeno de Calabazar de Sagua.

La tensión de contacto (40.66 V) está muy por debajo de la permisible por el cuerpo humano (1983.9 V) pues esta malla está muy sobredimensionada gastando recursos si sentido (figura 2.15).

El potencial de paso (7.97 V) está muy por debajo de los valores permisibles (6446.17 V) no presentando problema para la vida humana figura 2.16.

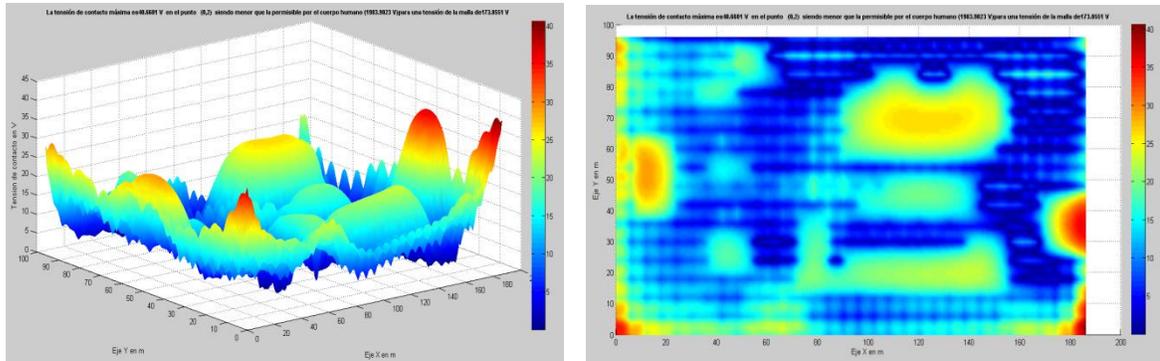


Figura 2.15 Potencial de contacto (Máximo 40.66 V y permisible 1983.9 V)

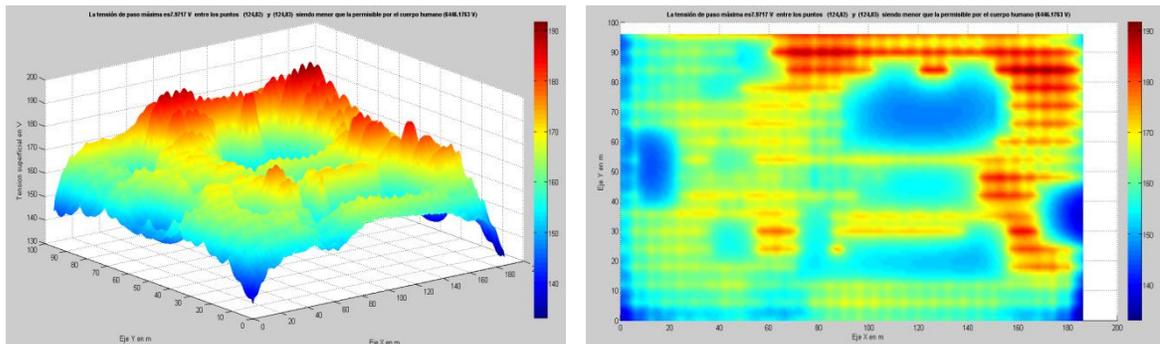


Figura 2.16 Potencial de paso (Máximo 7.97 V y permisible 6446.17 V)

Esta es una malla que está muy sobredimensionada por lo que su valor de resistencia (0.1324) está muy por debajo del normado no presentando problema (figura 2.17).

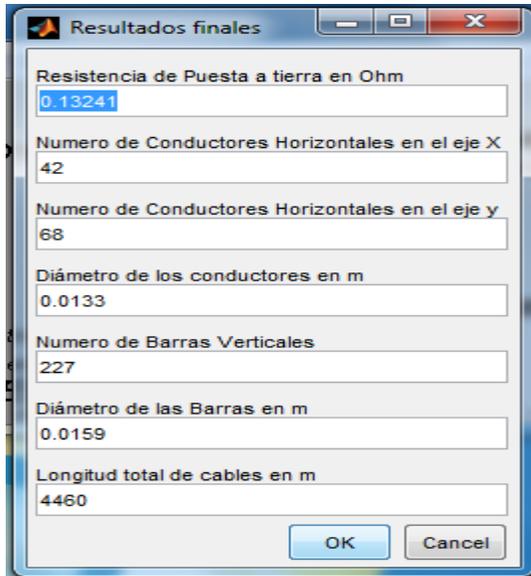


Figura 2.17 Resistencia de la malla.

2.2.4 Subestación 110/34.5 Calabazar de Sagua.

Esta subestación está dentro de los parámetros permisibles en cuanto a potencial de contacto (1149.56 V) siendo menor que la permisible por el cuerpo humano (2012.06 V) y tiene un diseño relativamente bueno (si no consideramos el hueco presente en el diseño), dentro de los parámetros y con el mínimo de gasto (figura 2.12).

El potencial de paso (167.93 V) está dentro de los valores permisibles (6558.83 V) no presentando problema para la vida humana (figura 2.13).

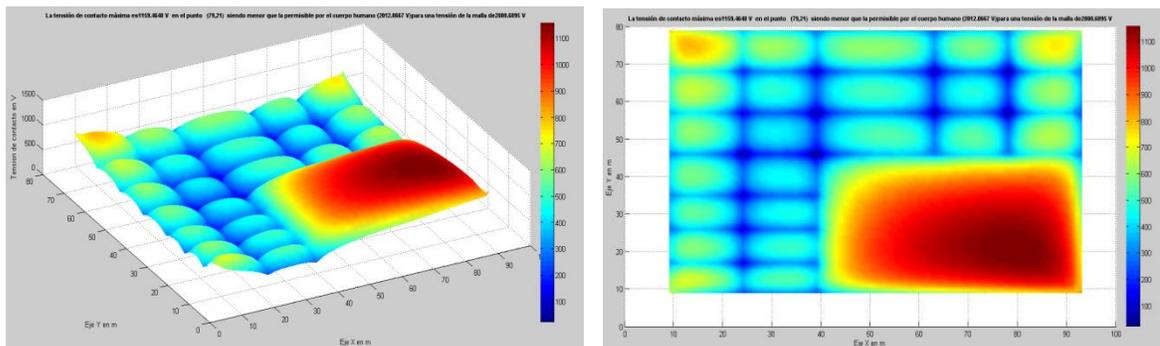


Figura 2.12 Potencial de contacto (Máximo 1149.56 V y permisible 2012.06 V)

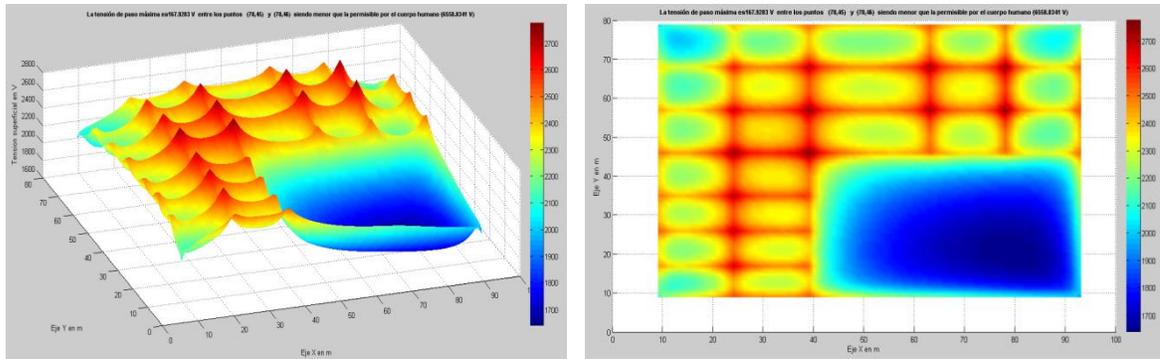


Figura 2.13 Potencial de paso (Máximo 167.93 V y permisible 6558.83 V)

La resistencia de esta malla (0.66493) está dentro de lo normado y es un valor logrado con el mínimo de gastos y que cumple los requisitos establecidos para una subestación de este voltaje (figura 2.14).

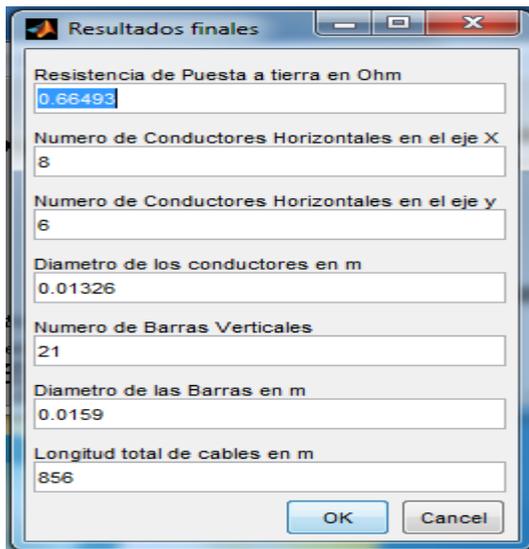


Figura 2.14 Resistencia de la malla.

2.2.5 Subestación 110/34.5 kV Camajuani.

Esta subestación se realizó sobre un montículo de tierra donde las mediciones que se hicieron no eran correctas y la subestación presenta graves problemas en cuanto a potenciales.

El potencial de contacto (7543.32 V) está muy por encima del permisible (2154.72 V) presentando un peligro eminente para visitantes y operarios de la subestación así como para los equipos que se encuentran en ella (figura 2.18).

El potencial de paso (362.31 V) está dentro de los valores permisibles (7129.44 V) no presentando problemas para la vida humana (figura 2.19).

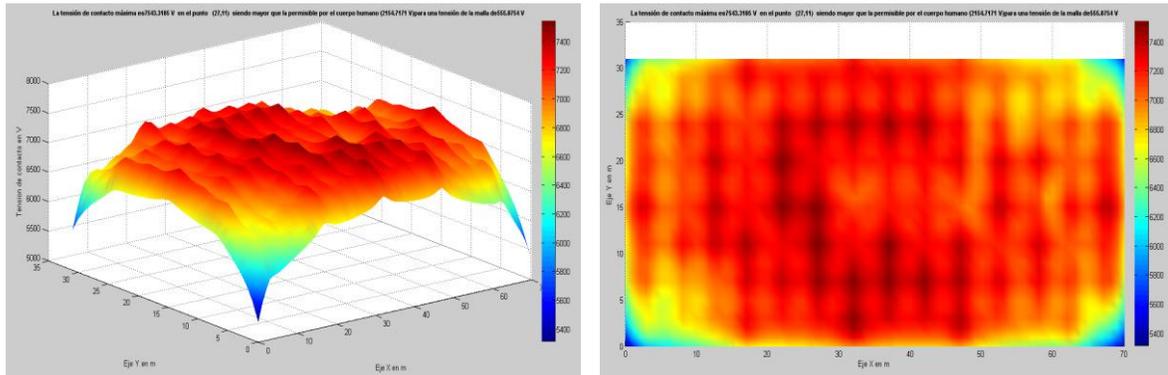


Figura 2.18 Potencial de contacto (Máximo 7543.32 V y permisible 2154.72 V)

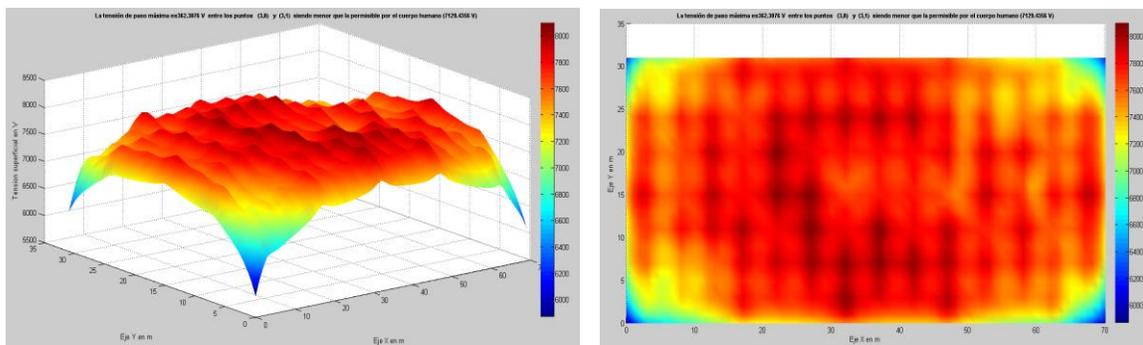


Figura 2.19 Potencial de paso (Máximo 362.31 V y permisible 7129.44 V)

Esta es una malla que aunque no cumple en cuanto a potenciales su resistencia (0.22235) se encuentra dentro de lo normado.

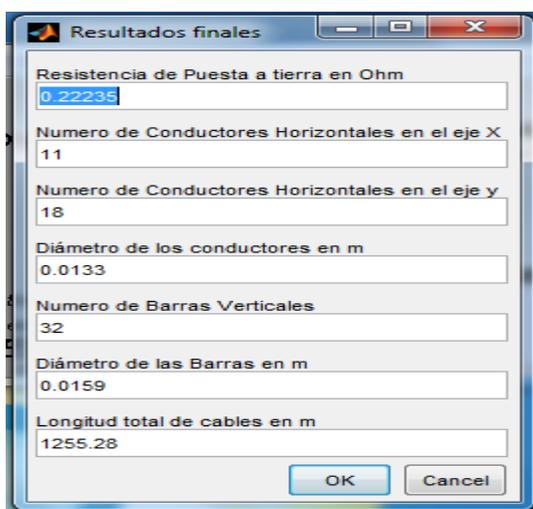


Figura 2.20 Resistencia de la malla.

CAPÍTULO 3. Evaluación de los métodos de reducción de resistencia y potenciales. Propuestas de solución a las subestaciones analizadas.

Como se mencionó anteriormente, existen varios métodos para mejorar los valores de resistencia y potenciales en mallas de tierra en las que con el tiempo se devalúan estos parámetros, en este capítulo se evalúa la efectividad de ellos.

Por otra parte se realiza un análisis de las mallas mencionadas en el Capítulo II, demostrándose las insuficiencias de los proyectos originales desde los puntos de vista técnico y económico.

3.1 Evaluación de la efectividad de los métodos de reducción de potenciales y resistencia.

Existen diferentes métodos para disminuir potenciales y resistencia, unos más efectivos que otros dependiendo de diversos factores que afectan las mallas de tierra. Es importante destacar que en mallas de reticulado uniforme los máximos potenciales de contacto se dan en los módulos esquinas.

3.1.1 Aumento del número de electrodos horizontales.

En una malla de tierra en explotación es posible aumentar el número de electrodos horizontales en dependencia de las características constructivas específicas de esta.

En la figura 3.1 se muestra una malla cuyos valores de resistencia y potenciales están fuera de lo normado, al evaluar un incremento en la cantidad de conductores como posible solución a estos problemas, se pudo comprobar (ver figura 3.2) que el incremento considerable en la cantidad de conductores no provocó una disminución apreciable en la resistencia tal como se mencionó en el Capítulo I, figura 1.5, donde a medida que se aumenta el número de electrodos la resistencia disminuye en forma asintótica a un valor superior al 70 % del valor de resistencia de una malla perimétrica de iguales dimensiones, llegando a un punto en que por más electrodos que se coloquen la variación de resistencia es prácticamente ninguna.

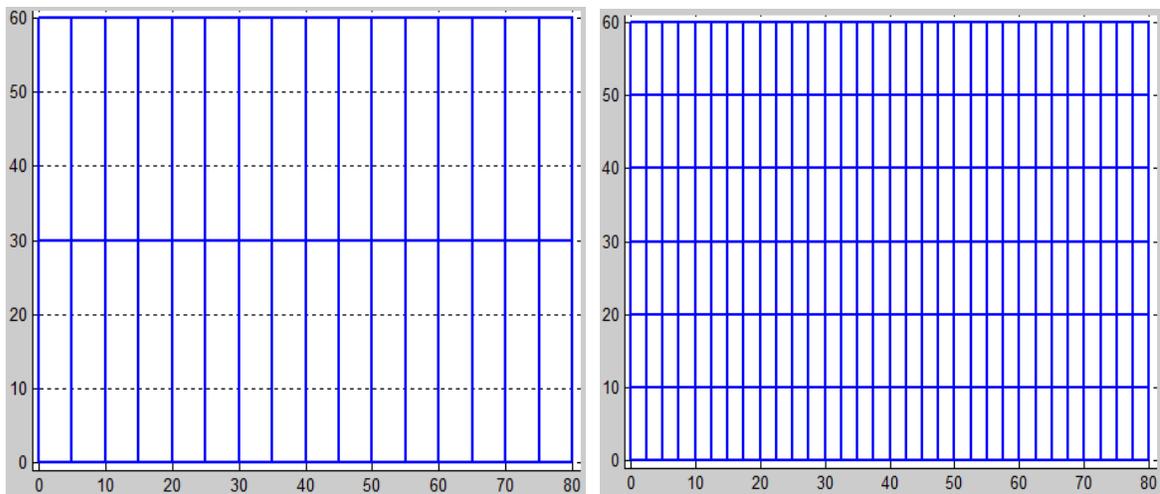


Figura 3.1 Configuración con y sin aumento de electrodos.

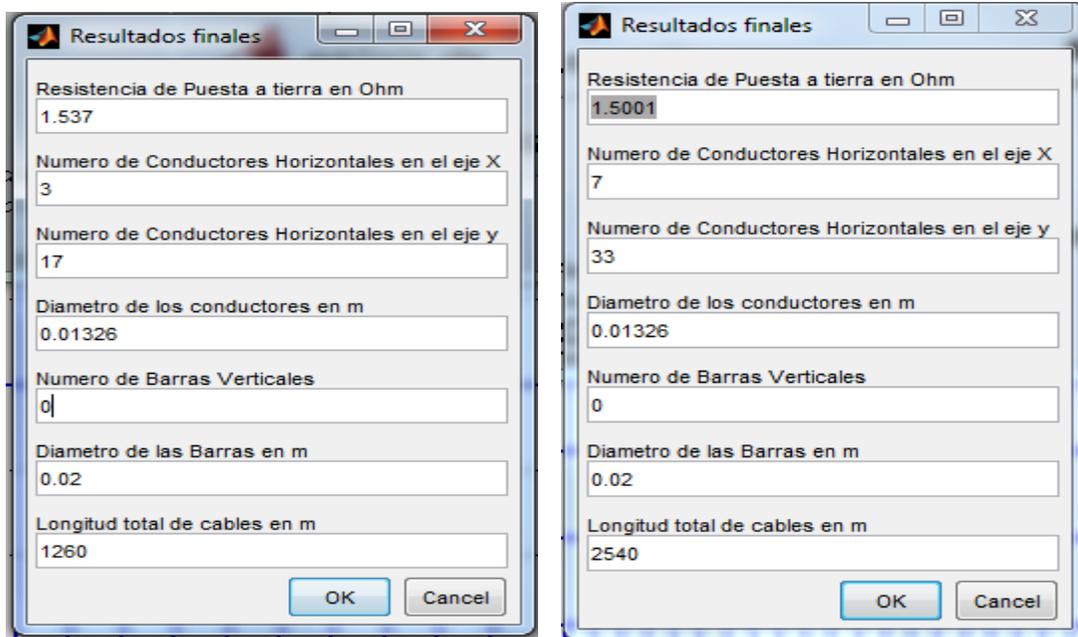


Figura 3.2 Resistencia de ambas configuraciones de electrodos.

Con respecto a los potenciales de contacto se pudo apreciar que el aumento del número de conductores disminuye los potenciales aunque de una manera poco eficiente (figura 3.3), pues solo disminuye de 1866.4 V que era el valor original a 1680.4 V, además de ser muy costoso

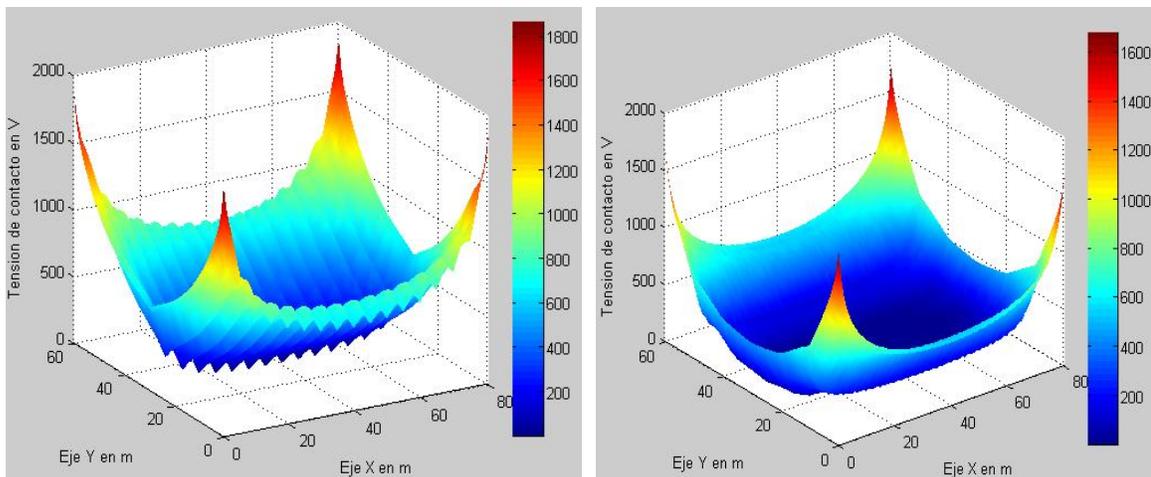


Figura 3.3 Potenciales de contacto.

3.1.2 Aumento de la longitud de los electrodos verticales.

El aumento de la longitud de los electrodos verticales se hace con el objetivo de buscar estratos de menor resistividad o estratos donde la humedad se estabilice y con ella la resistividad. En la figura 3.4 se muestra la configuración de una malla a la que se le incorporan electrodos verticales, en este caso se supone un primer estrato con una resistividad de $300 \Omega \cdot m$ y 1 m de espesor y un segundo estrato de una resistividad baja de $40 \Omega \cdot m$, como se puede apreciar en la figura 3.5 se produce una disminución apreciable de la resistencia. Es importante destacar que esta disminución se logra solo para unas condiciones como estas, en la que los electrodos verticales penetran un terreno de muy baja resistividad, si la resistividad del segundo estrato es superior a la del primero la resistencia aumenta considerablemente.

Con respecto a los potenciales, dependen mucho de la resistividad del estrato donde se introduce el electrodo vertical, si este alcanza estratos de menor resistividad la mejora en cuanto a potenciales es apreciable, por el contrario si alcanza estratos de mayor resistividad los potenciales de la malla aumentan. En la figura 3.6 se muestra la mejoría en cuanto a potencial de contacto, en una malla que no tiene electrodos verticales y se le añade este tipo de electrodo, de manera tal que alcanzan estratos de menor resistividad que en los que estaban inmersos los electrodos horizontales que conformaban la malla. Por lo que el método es efectivo tanto para disminución de resistencia como potenciales, lo cual compensa su elevado costo.

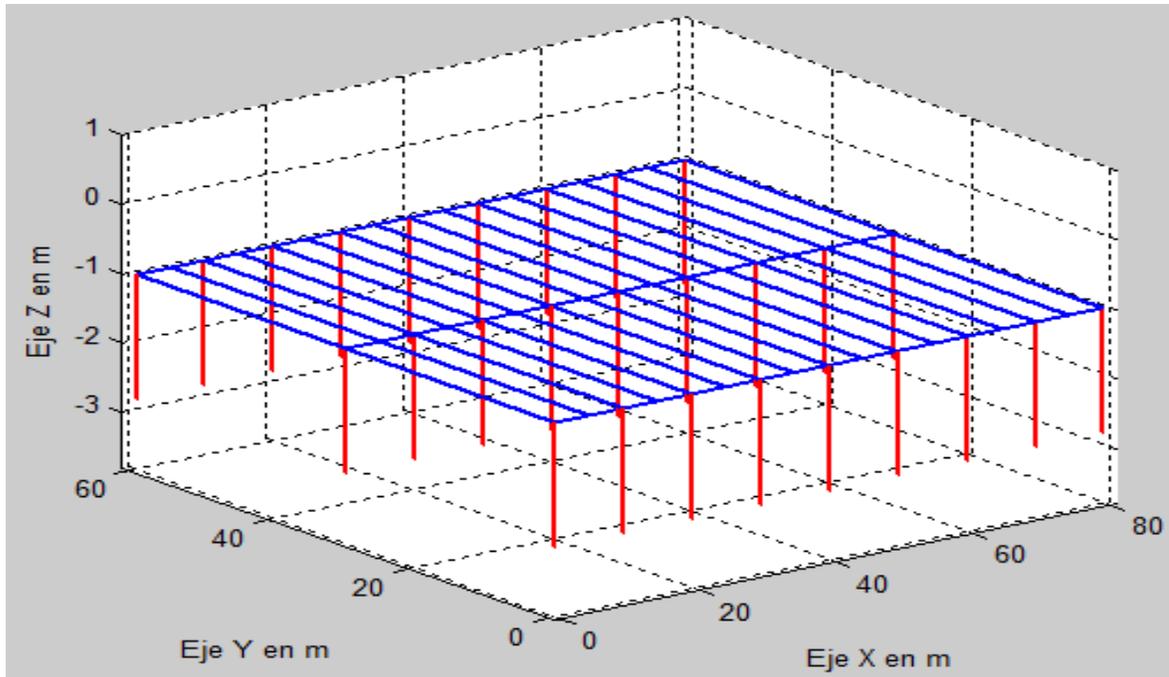


Figura 3.4 Configuración de malla con electrodos.

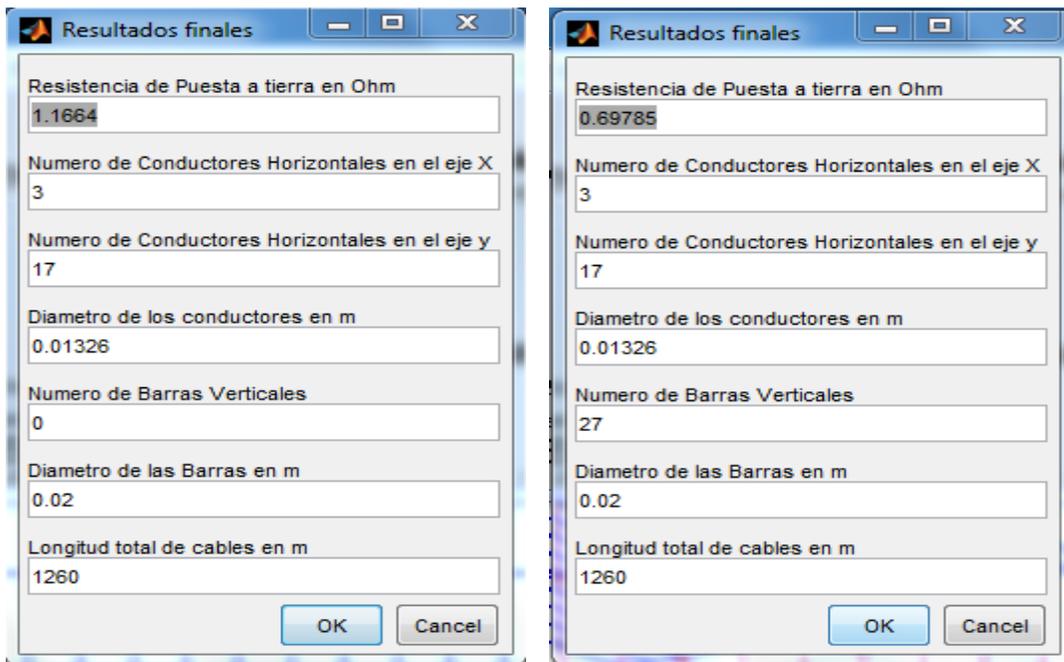


Figura 3.5 Resistencia de la malla con y sin electrodos verticales.

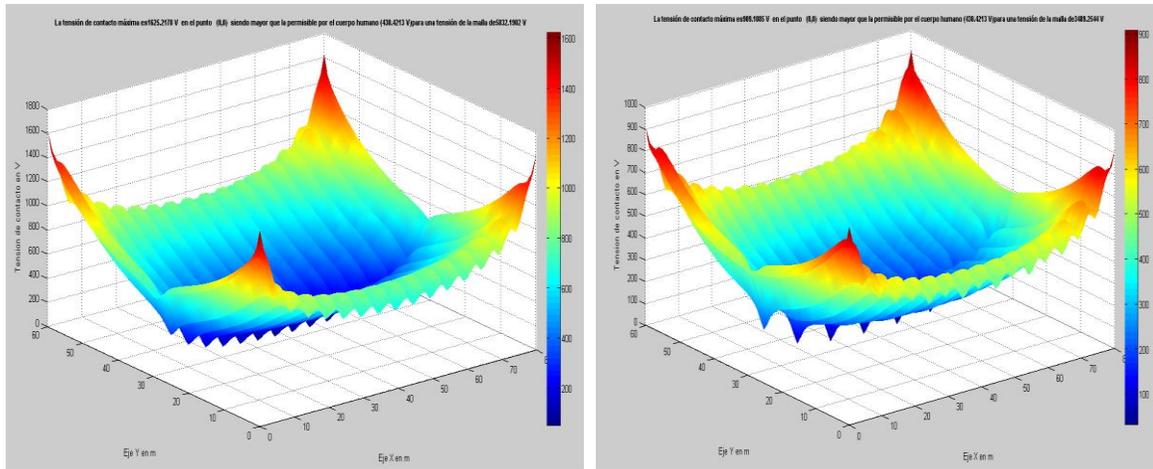


Figura 3.6 Variación de los potenciales con y sin electrodos verticales.

3.1.3 Aumento de la distancia entre los electrodos horizontales interiores y disminución de la distancia en los exteriores.

La variación de la distribución de los conductores dentro de la malla tal como se muestra en la figura 3.7, no provoca una disminución de la resistencia, pero si una disminución apreciable de los potenciales de contacto.

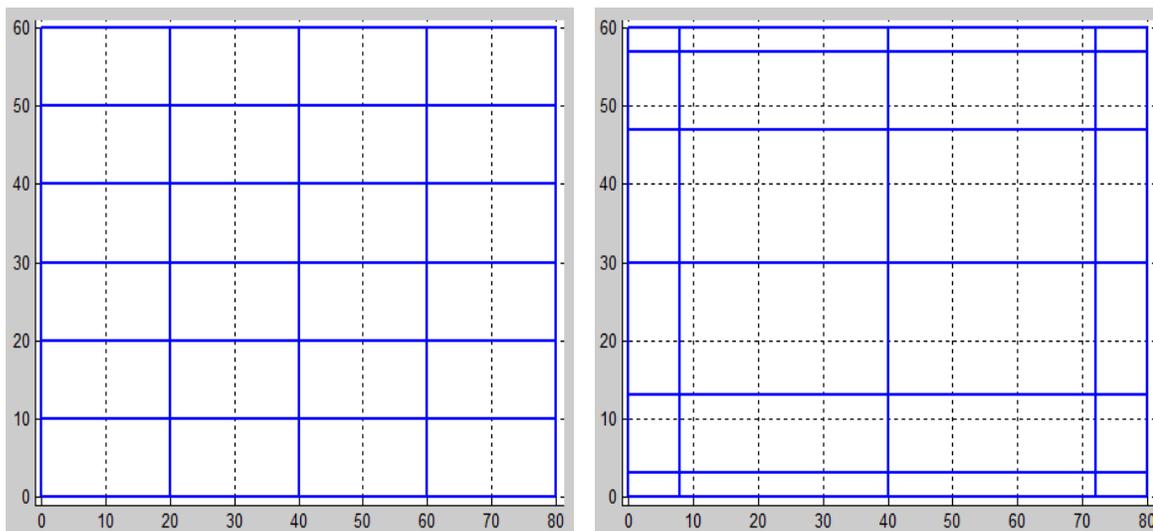


Figura 3.7 Configuración de electrodos de una malla optimizada y sin optimizar.

En la figura 3.8 se puede observar que la disminución en cuanto a resistencia no es apreciable, debido a que se mantiene la misma cantidad de conductores y solo se varía la separación entre ellos lo que disminuye ligeramente la resistencia mutua y con ello la resistencia total.

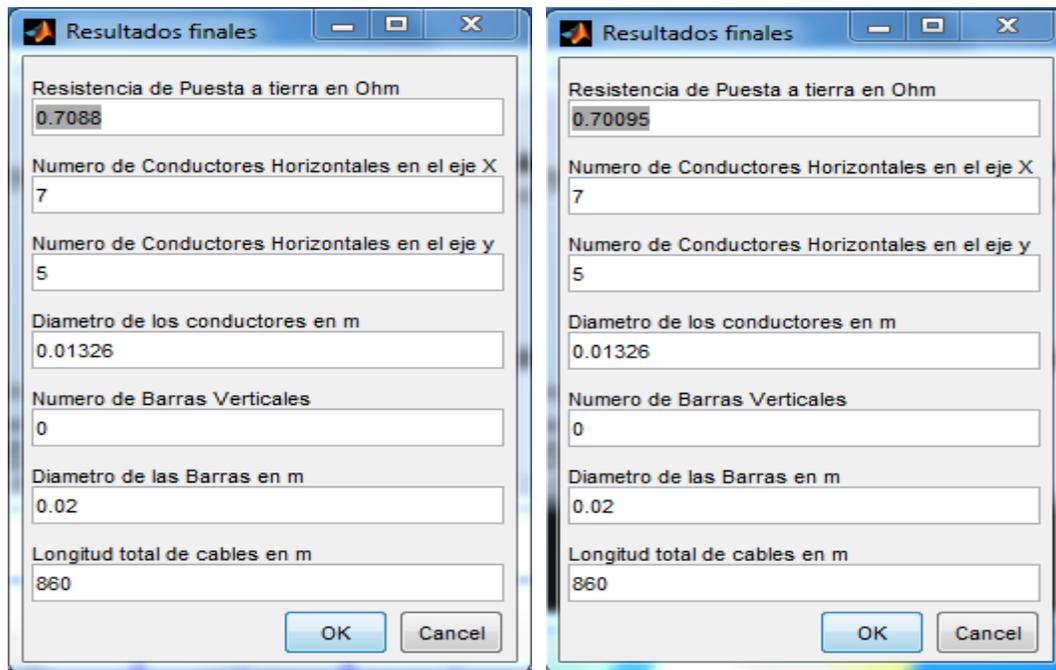


Figura 3.8 Resistencia de la malla sin optimizar y optimizada.

Por otra parte se puede observar en la figura 3.9 que los potenciales disminuyen considerablemente de 1010 V hasta 891 V, demostrándose que este es un método muy efectivo en la disminución de los potenciales, pero que puede también resultar costoso.

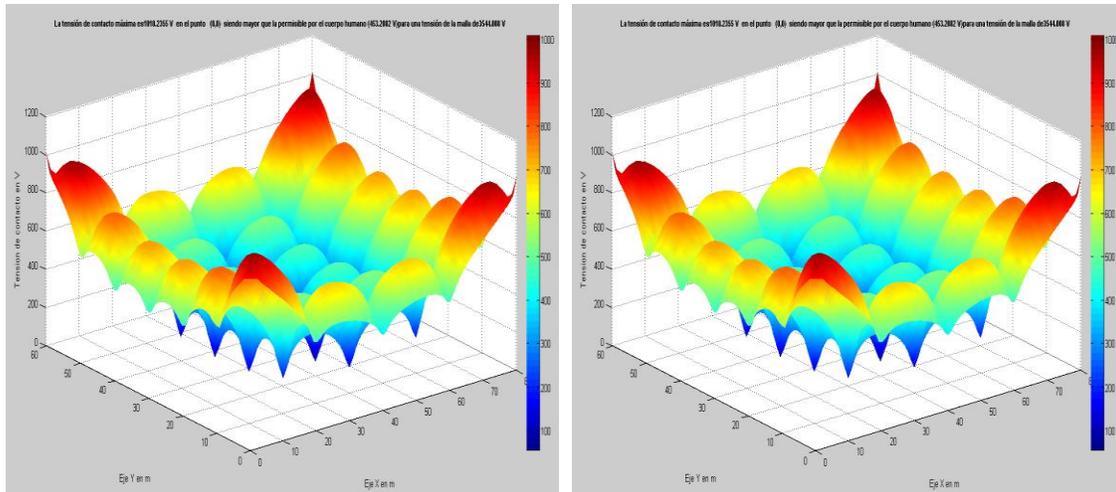


Figura 3.9 Potenciales de una malla sin optimizar y optimizada.

3.1.4 Cambio del terreno existente por otro de menor resistividad.

Este es un método que si bien es muy efectivo en la disminución de resistencia y potenciales, desde el punto de vista económico no es factible, pues se necesitan realizar grandes movimientos de tierra, grandes gastos en mano de obra, lo que encarece grandemente el método, representando una opción solo cuando ya se hayan agotado las demás opciones para llevar la malla a los valores permisibles por las normas.

3.1.5 Tratamiento químico y electrolítico del suelo.

El tratamiento químico del suelo (figura 3.10 a) es un método muy efectivo en la disminución de la resistencia de la malla, sin la necesidad de usar gran cantidad de electrodos, pero hay que tener en cuenta diversos factores, sobre todo el económico (capítulo 1 epígrafe 1.6.5). Otra variante es utilizar electrodos químicamente activos (3.10 b)

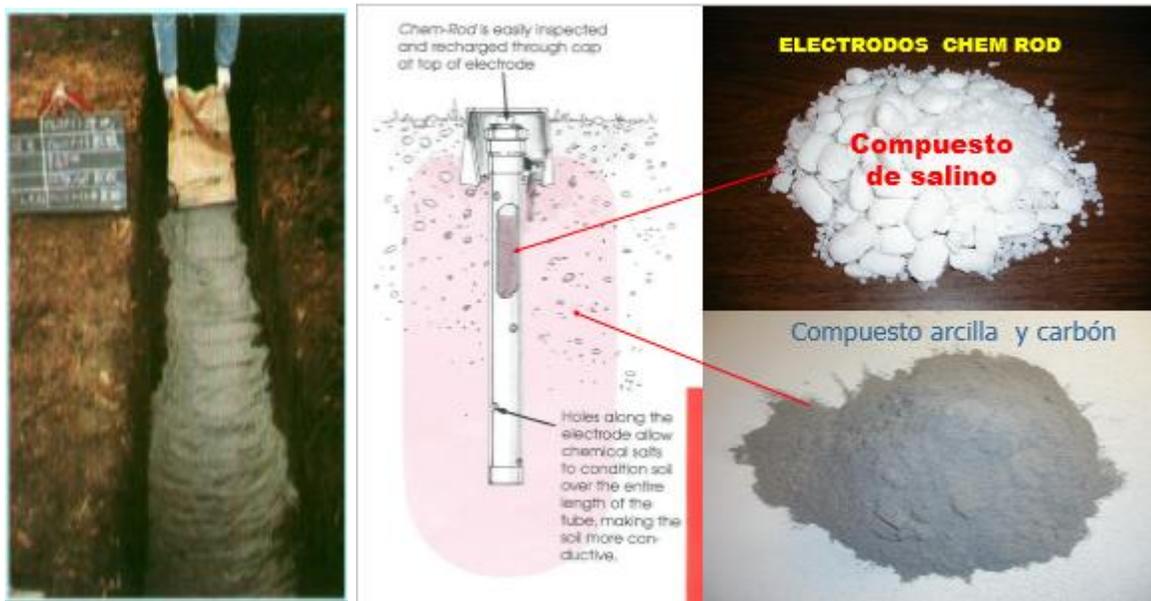


Figura 3.10 Tratamiento químico y electrolítico del suelo. a) Electrodo horizontal. b) Electrodo vertical.

3.1.6 Utilización de elemento especiales.

Los elementos especiales no son más que conductores colocados en los módulos esquina, los cuales dividen estos en dos o cuatro partes, siendo el más utilizado y efectivo el de las cruces (figura 3.11) o el uso de electrodos verticales en estos módulos. Este es un método fundamentalmente efectivo para disminuir los potenciales en los módulos esquina como se puede apreciar en la figura 3.12 y puede resultar poco costoso en dependencia del tamaño de los elementos especiales .

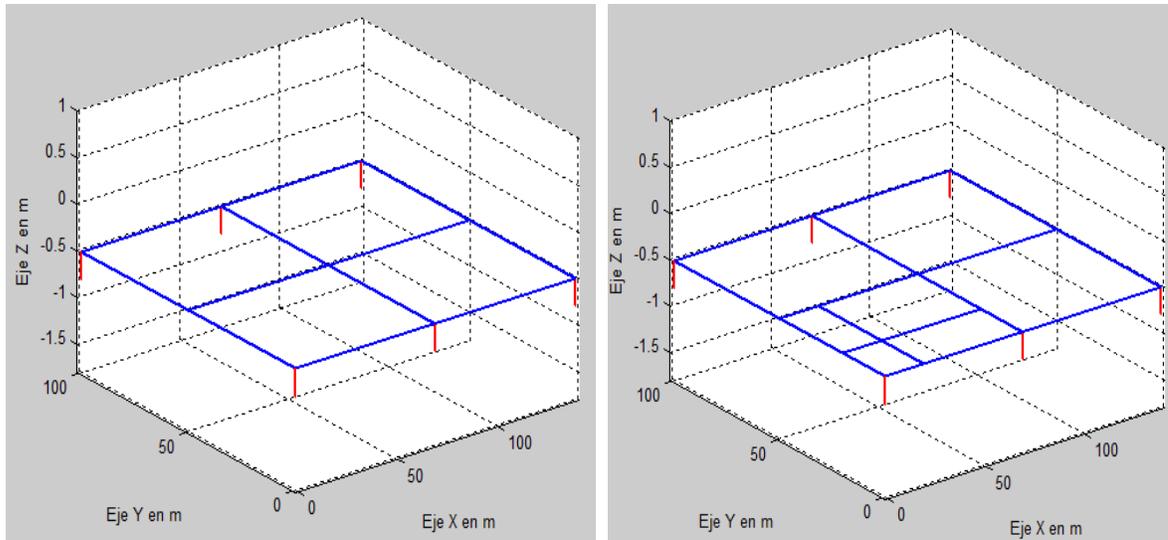


Figura 3.11 Configuración de electrodos con elementos especiales.

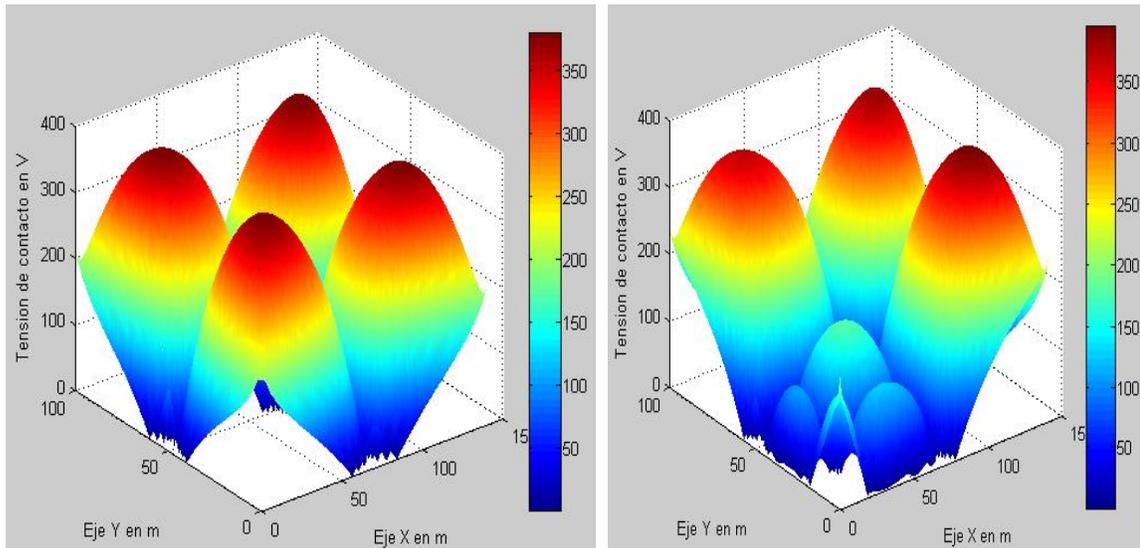


Figura 3.12 Representación de los potenciales con y sin módulos especiales.

3.1.7 Aumento del área de la malla.

El aumento del área de la malla es el método más eficaz en la disminución de la resistencia (figura 3.13) y además el más económico, teniendo como principal inconveniente la disponibilidad de terreno.

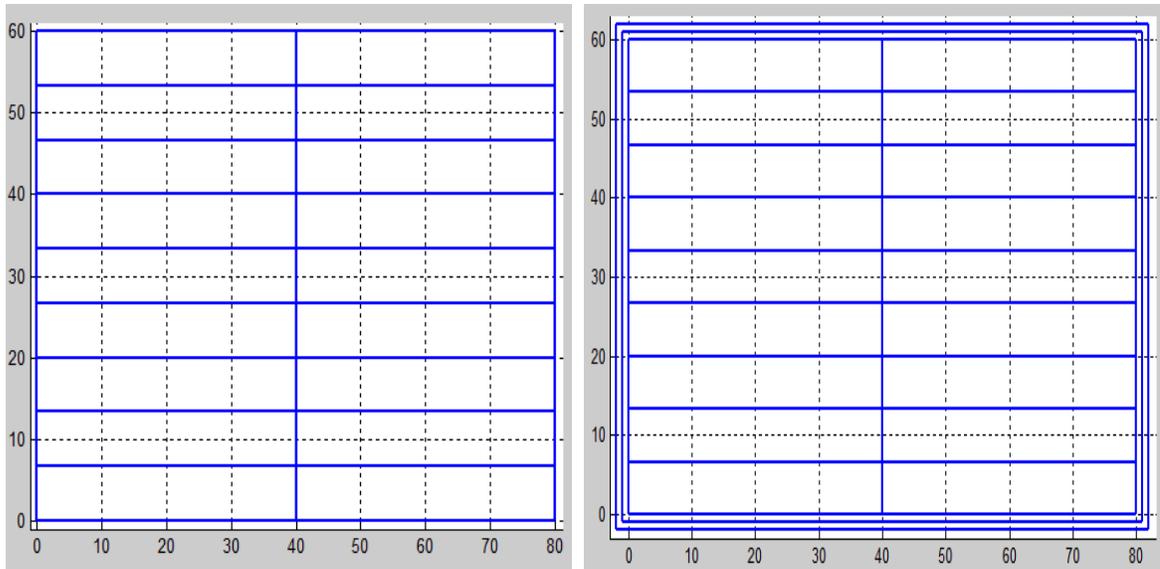


Figura 3.13 Configuración de electrodos con y sin malla periférica.

En la figura 3.14 se evidencia la eficacia de este método en la disminución de la resistencia de la malla.

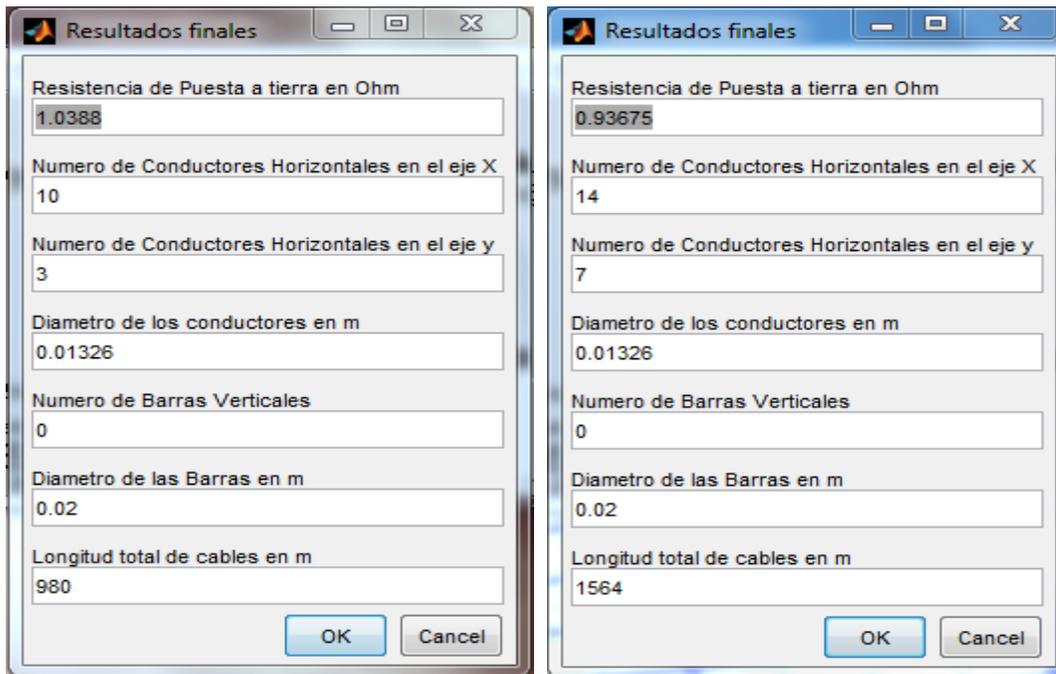


Figura 3.14 Resistencia de la malla.

3.2 Análisis económico a las subestaciones analizadas.

Es necesario realizar un análisis de las diferentes mallas de estos grupos electrógenos por el marcado sobredimensionamiento que presentan y la repercusión económica que esto representa para la UNE y el país, con el objetivo de encender la alarma en los principales directivos y obligar a realizar proyectos con más calidad y bien diseñados.

3.2.1 Grupo electrógeno Fuel Oil Santa Clara 110 kV.

Este es un grupo electrógeno con un marcado sobredimensionamiento, lo demuestra sus 195 electrodos verticales (figura 3.15 a) y el valor de resistencia tan minúsculo que se obtiene al correr esta malla (figura 3.16 a)

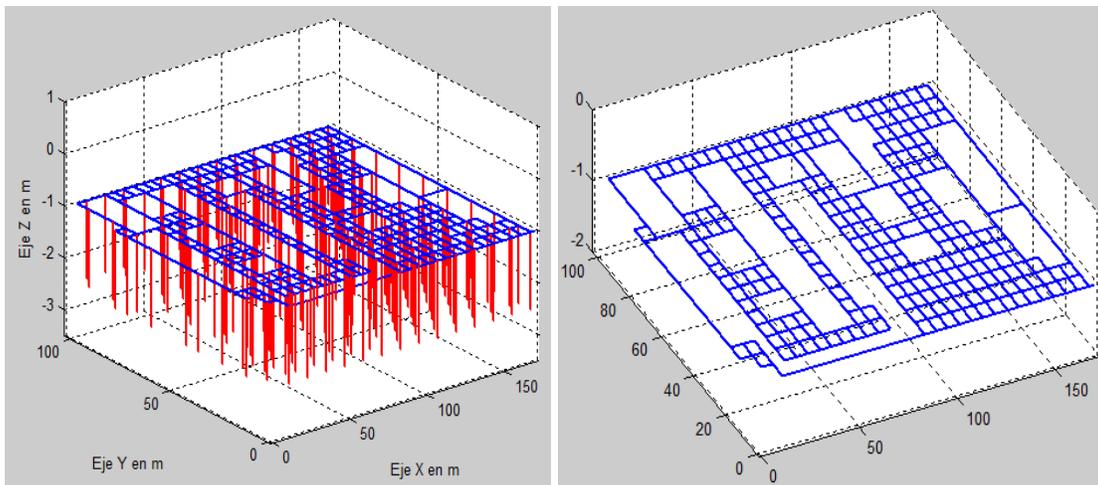


Figura 3.15 Configuración de electrodos a) Con electrodos verticales. b) Sin electrodos verticales.

En la figura 3.14 b se muestra la configuración de electrodos de la misma malla pero sin electrodos verticales, la cual cumple con las solicitudes de resistencia (figura 3.15 b) y potenciales.

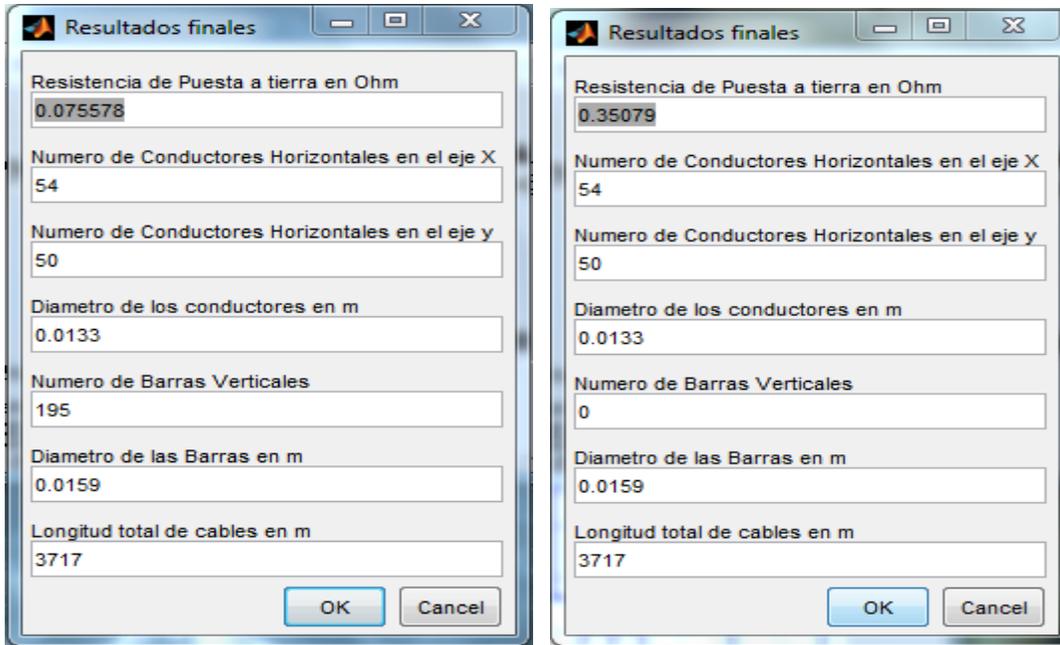


Figura 3.16 Resistencia de la malla. a) Con electrodos verticales. b) Sin electrodos verticales.

Después de hacer un análisis económico de ambas mallas (figura 3.17) se demuestra la cantidad de dinero que se hubiera ahorrado eliminando solamente los electrodos verticales.

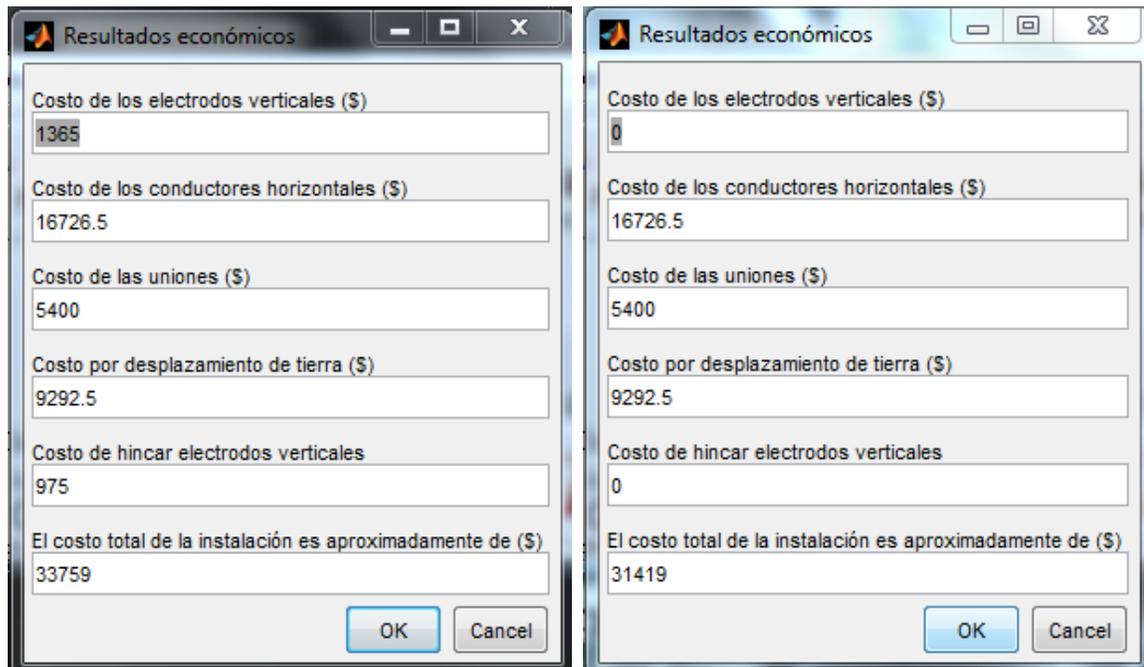


Figura 3.17 Balance económico de ambas mallas.

3.2.2 Grupo electrógeno Santa Clara Industrial.

Este es otro grupo electrógeno que presenta el mismo problema que el anterior, un sobredimensionamiento excesivo, con 269 electrodos verticales si sentido alguno, producto de la estandarización de los proyectos. En la figura 3.18 se muestra la configuración de la malla con y sin electrodos verticales.

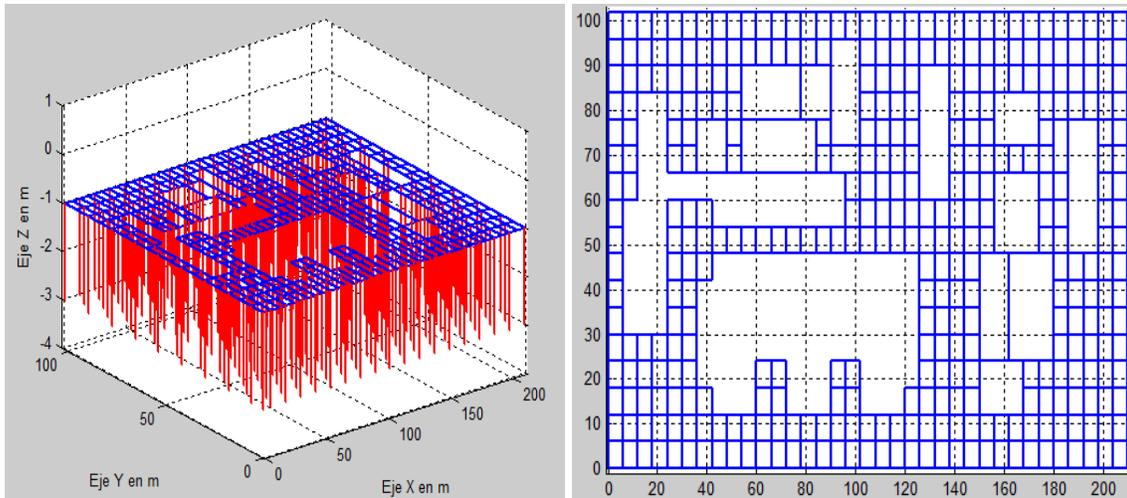


Figura 3.18 Configuración de electrodos.

Al correr ambas mallas con el programa PAST dio los resultados en resistencia que se muestran en la figura 3.19, donde se demuestra que esta malla sin electrodos verticales cumple los valores permisibles en cuanto a resistencia. También cumple los valores permisibles en cuanto a potenciales, solo que no se muestra la figura.

Haciendo un balance económico de las mallas (figura3.20), se evidencia un ahorro de más de 3000 CUC si solo no se hubieran colocado los electrodos verticales, no exceptuando que se pueda disminuir la cantidad de electrodos horizontales e inclusive disminuir el área de la malla.

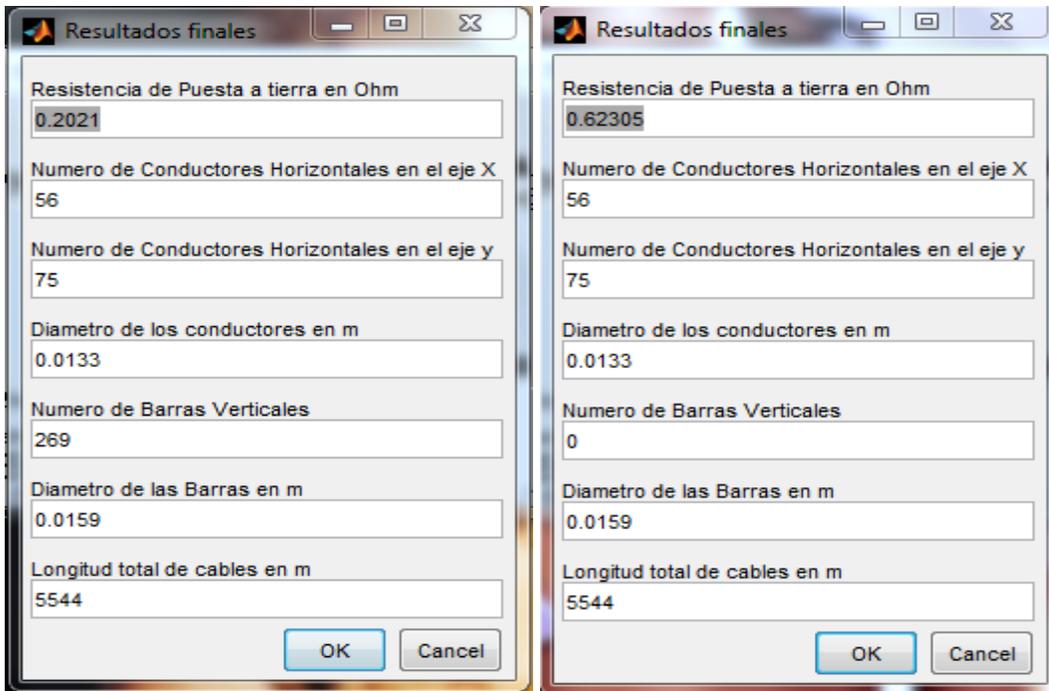


Figura 3.19 Resistencia de puesta a tierra de ambas mallas.

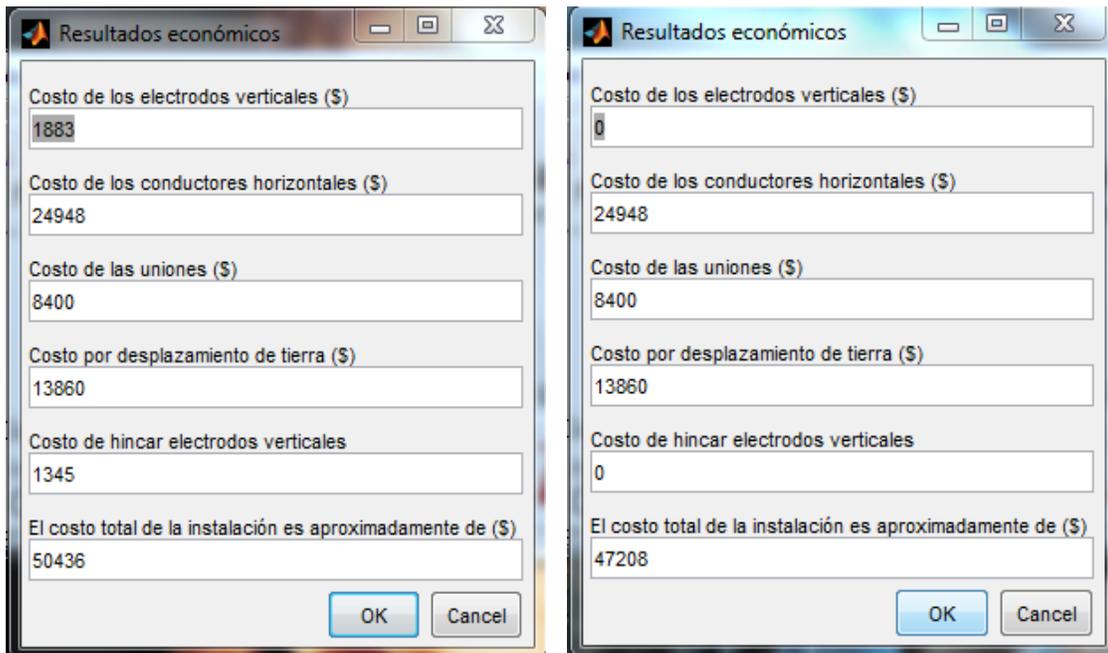


Figura 3.20 Balance económico de ambas mallas.

3.2.3 Grupo electrógeno Calabazar de Sagua.

El grupo electrógeno de Calabazar de Sagua presenta un extremado sobredimensionamiento, con 227 electrodos verticales y 110 horizontales (figura 3.21 a), cuando la configuración de la malla sin electrodos verticales (figura 3.21 b) cumple con las normas en cuanto a resistencia y potenciales.

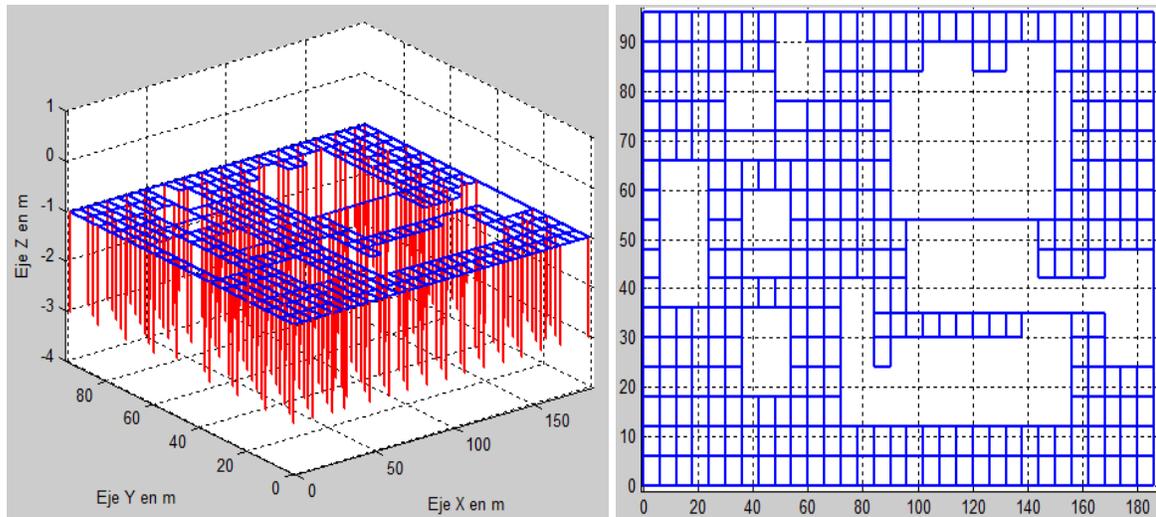


Figura 3.21 Configuración de electrodos. a) Con electrodos verticales. b) Sin electrodos verticales.

Los valores de resistencia, ambos dentro de lo permisible (figura 3.22), demuestran el gasto económico que se utilizó en vano en este grupo electrógeno, por seguir arrastrando con el problema de la estandarización de los proyectos y no hacer las mediciones pertinentes para proyectar un buen proyecto, con el mínimo de gastos, e inclusive por no contar con el personal calificado ni los equipos idóneos para realizar dichas mediciones. En la figura 3.23 se muestra una comparación económica de esta malla con y sin electrodos verticales, no descartando la eliminación de electrodos horizontales.

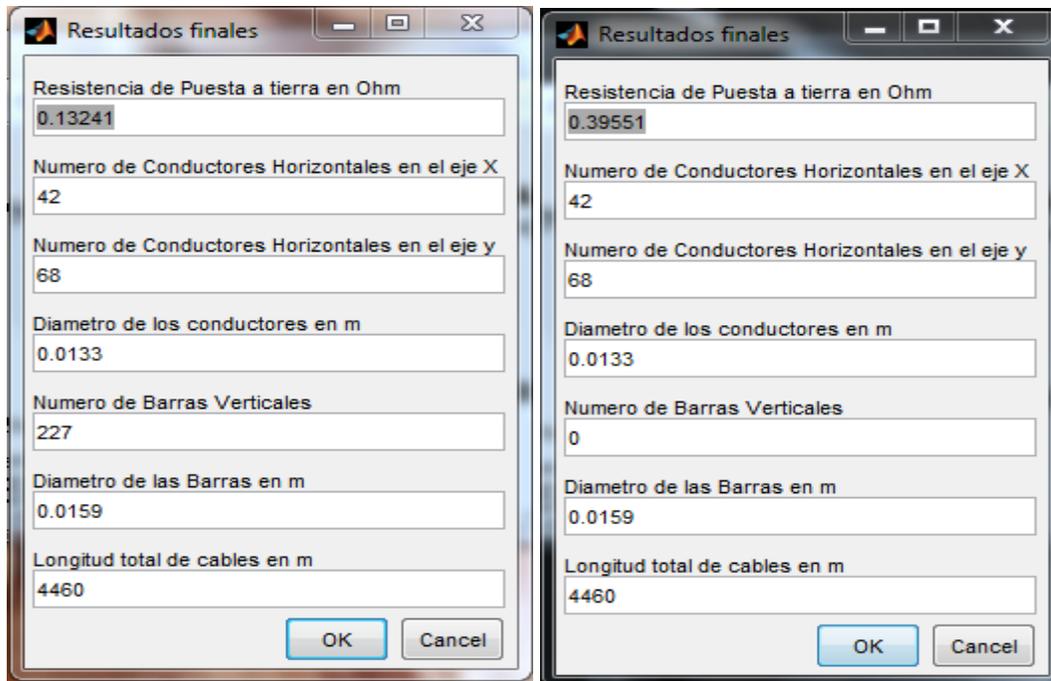


Figura 3.22 Valores de resistencia.

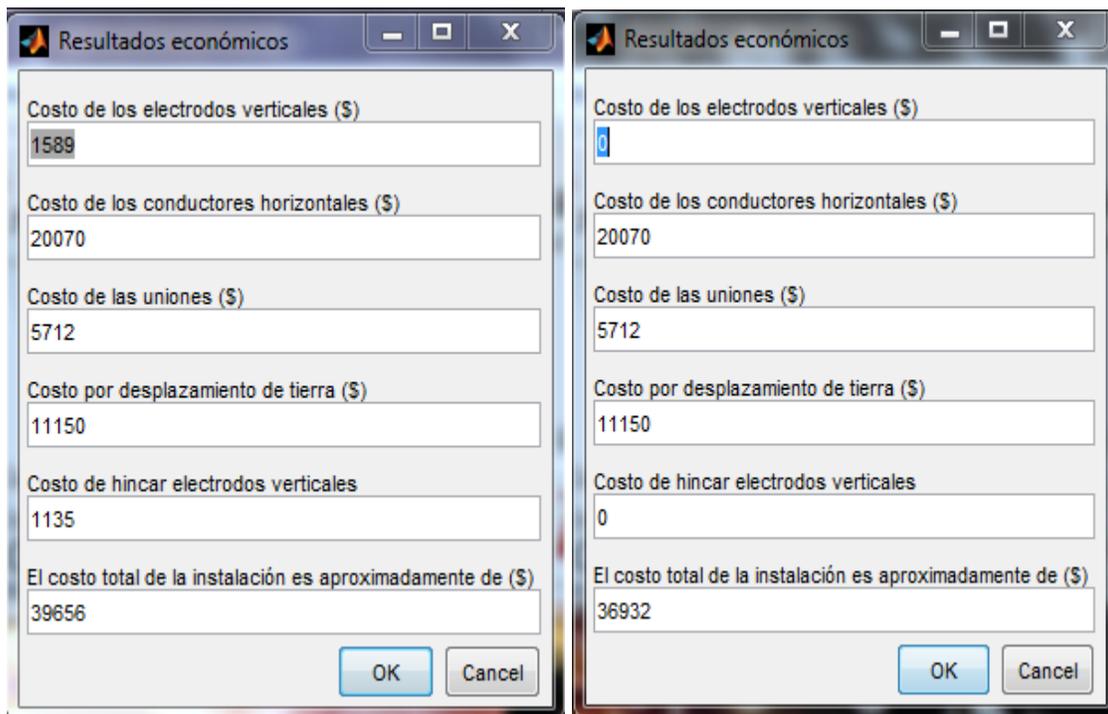


Figura 3.23 Balance económico de las dos mallas.

3.3 Propuestas óptimas de mallas a los grupos electrógenos analizados.

Como se puede apreciar todas las mallas de los grupos electrógenos anteriormente analizados están exageradamente sobredimensionadas, por lo que a continuación se mostrarán propuestas de mallas que son por mucho más económicas que todas las mallas ejecutadas, lo cual pone de manifiesto la inmensa cantidad de dinero que se ha enterrado en la ejecución de estos proyectos. Esto se multiplica por los más de 50 grupos electrógenos instalados en el país.

3.3.1 Propuesta óptima de malla grupo electrógeno Fuel Oil Santa Clara 110kV.

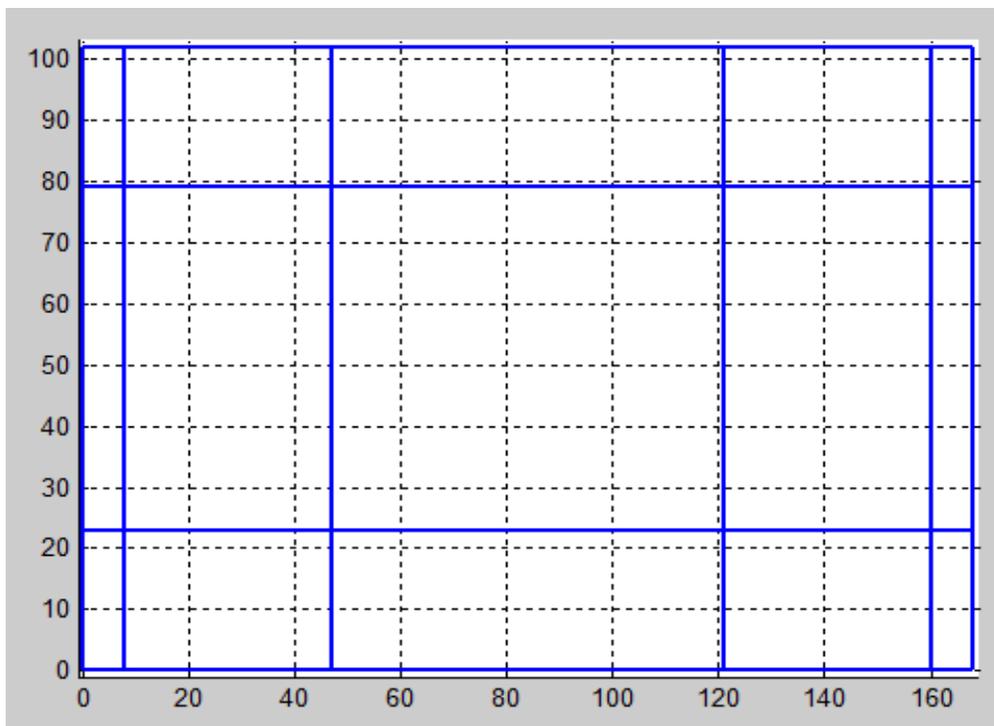


Figura 3.24 Configuración de electrodos.

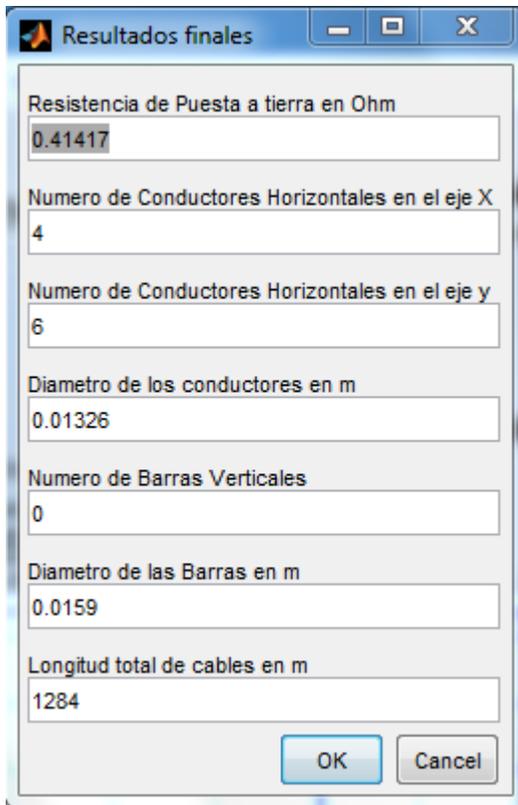


Figura 3.25 Resistencia de puesta a tierra.

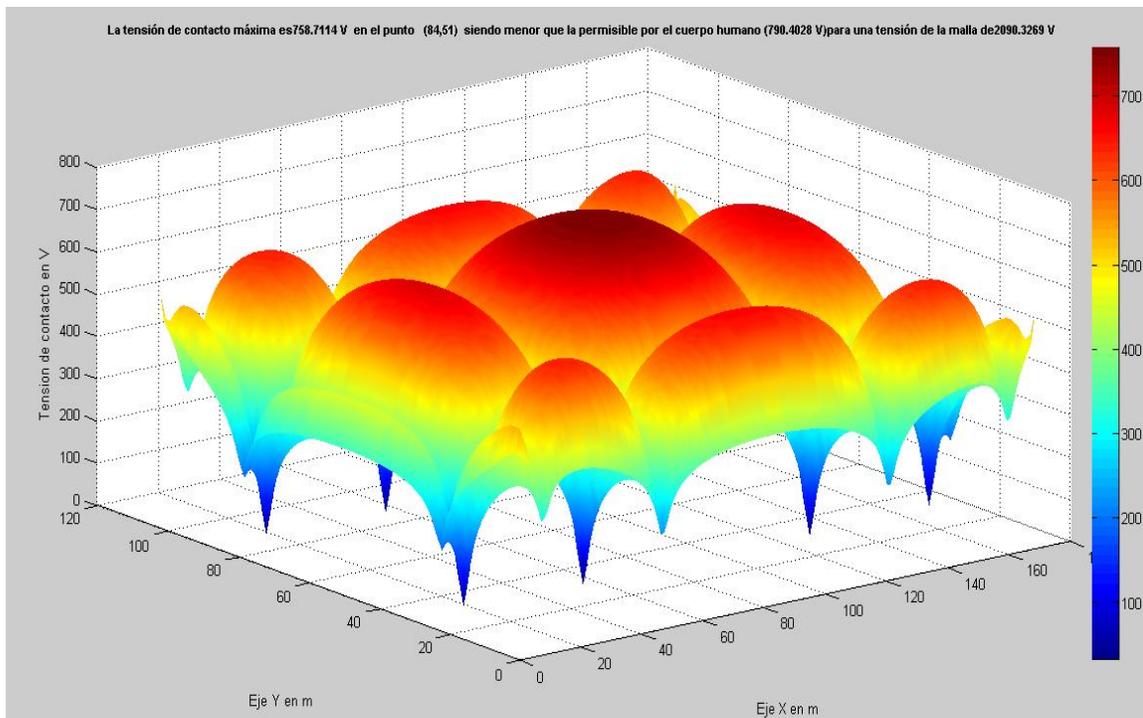


Figura 3.26 Potencial de contacto.

Item	Costo (\$)
Costo de los electrodos verticales (\$)	0
Costo de los conductores horizontales (\$)	5778
Costo de las uniones (\$)	48
Costo por desplazamiento de tierra (\$)	3210
Costo de hincar electrodos verticales	0
El costo total de la instalación es aproximadamente de (\$)	9036

Figura 3.27 Balance económico.

3.3.2 Propuesta óptima de malla grupo electrógeno Santa Clara Industrial.

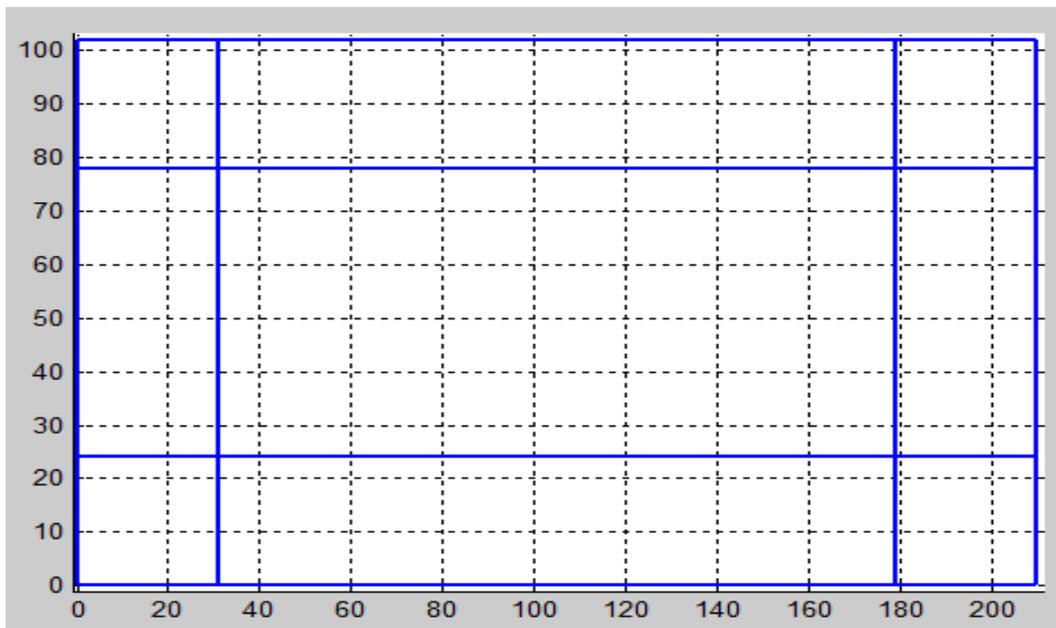


Figura 3.28 Configuración de electrodos.

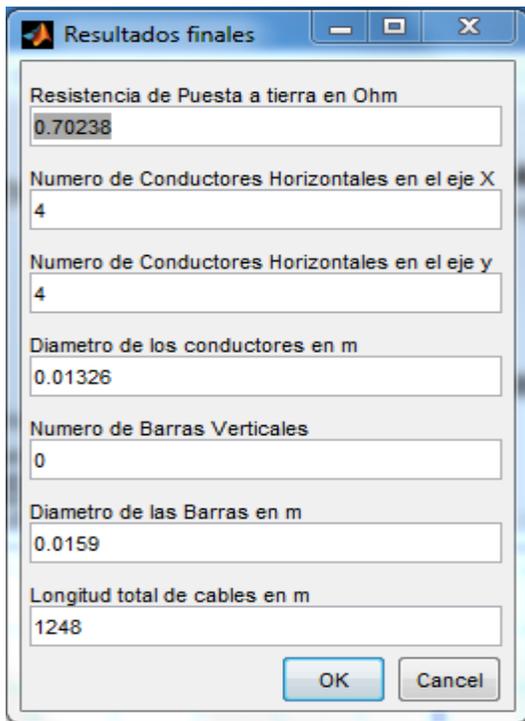


Figura 3.29 Resistencia de puesta a tierra.

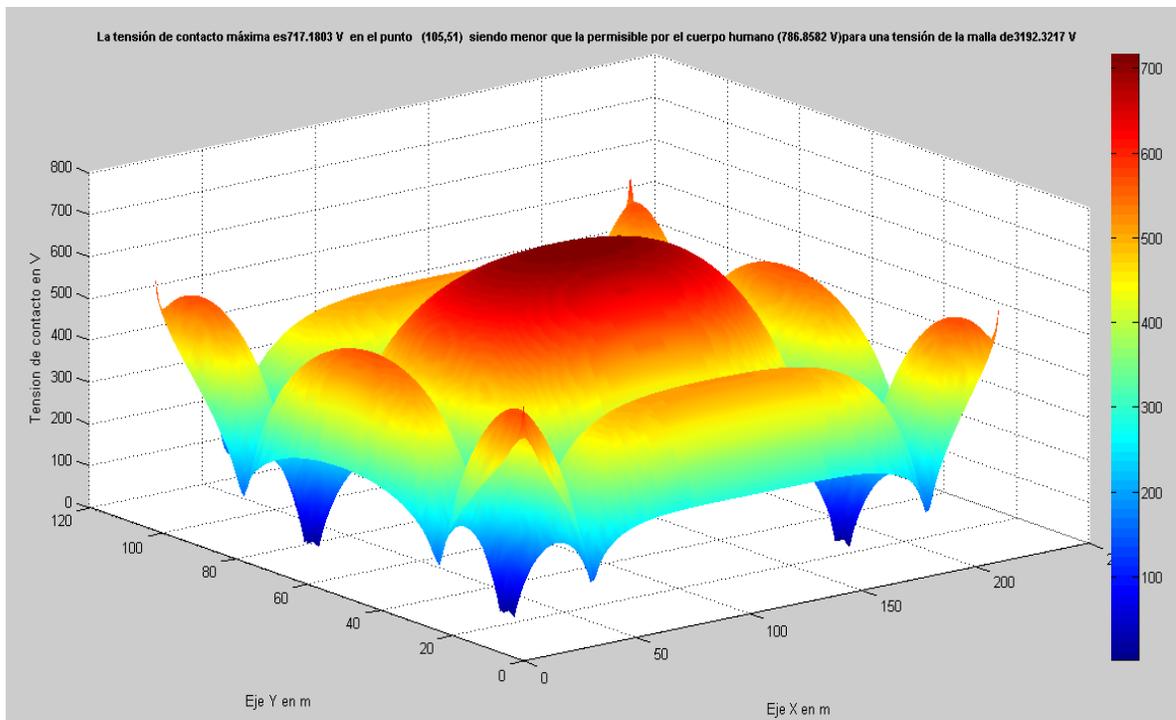


Figura 3.30 Potencial de contacto.

Item	Costo (\$)
Costo de los electrodos verticales (\$)	0
Costo de los conductores horizontales (\$)	5616
Costo de las uniones (\$)	32
Costo por desplazamiento de tierra (\$)	3120
Costo de hincar electrodos verticales	0
El costo total de la instalación es aproximadamente de (\$)	8768

Figura 3.31 Balance económico.

3.3.3 Propuesta óptima de malla grupo electrógeno Calabazar de Sagua.

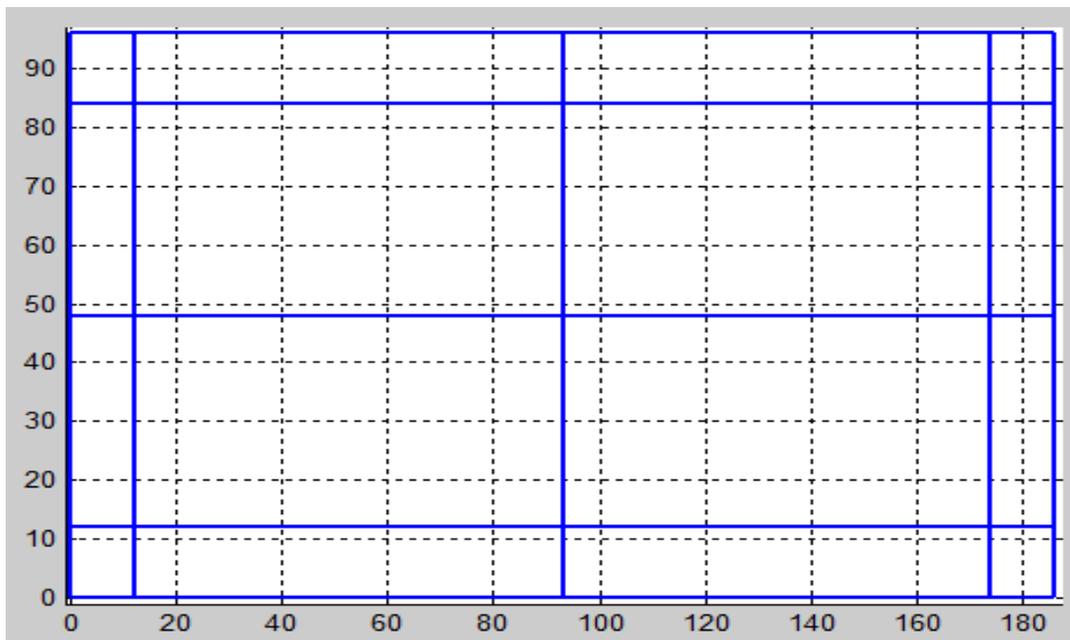


Figura 3.32 Configuración de electrodos.

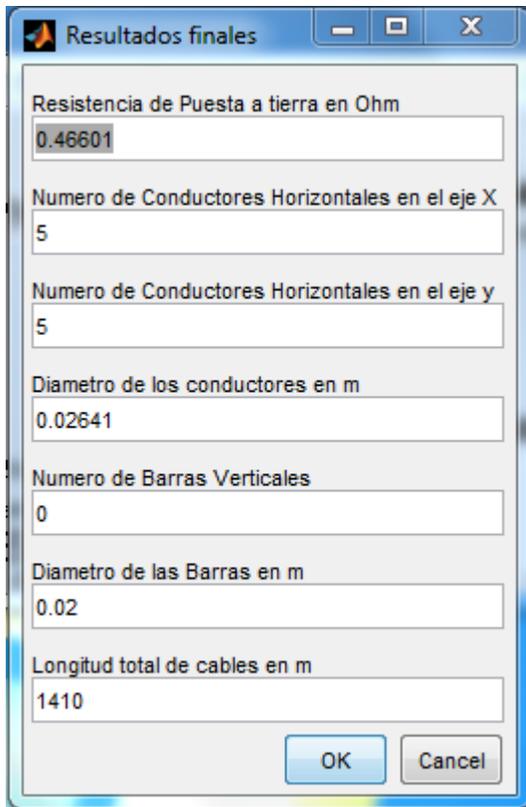


Figura 3.33 Resistencia de puesta a tierra.

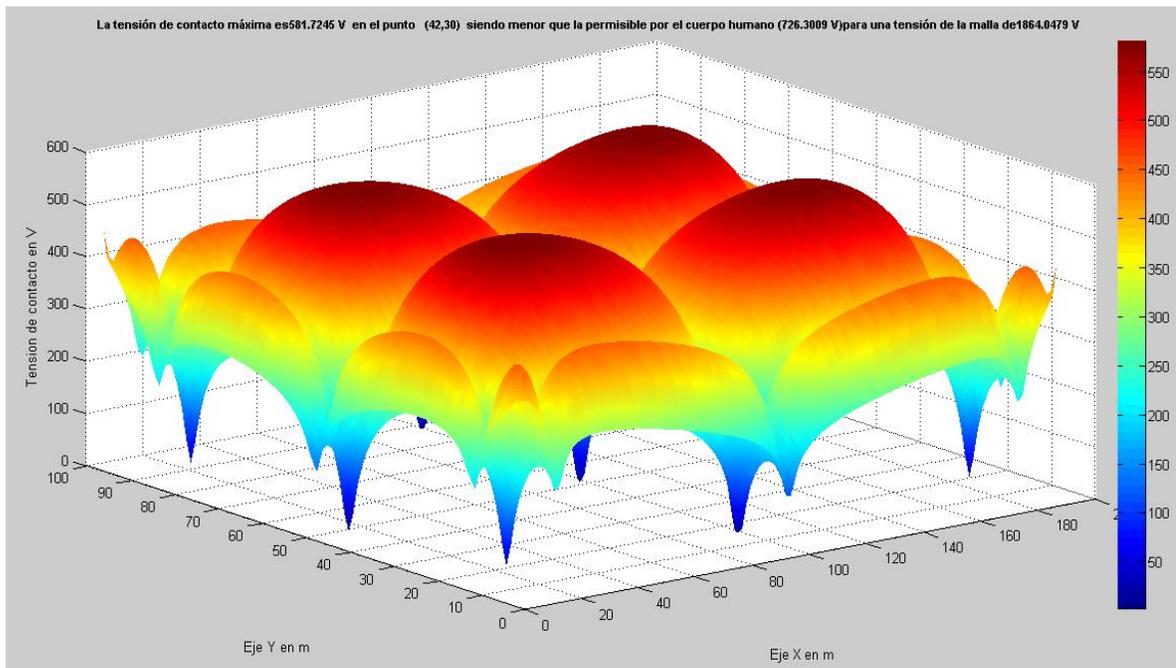
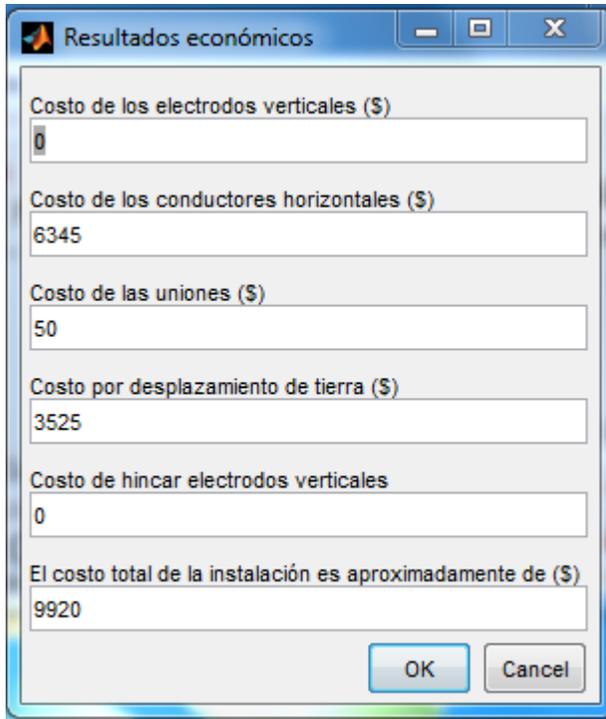


Figura 3.34 Potencial de paso.



Ítem	Costo (\$)
Costo de los electrodos verticales (\$)	0
Costo de los conductores horizontales (\$)	6345
Costo de las uniones (\$)	50
Costo por desplazamiento de tierra (\$)	3525
Costo de hincar electrodos verticales	0
El costo total de la instalación es aproximadamente de (\$)	9920

Figura 3.35 Balance económico.

3.4 Propuesta a la subestación móvil Camajuaní 110/34.5.

Esta es una subestación que se construyó sobre un montículo de tierra, debido a lo cual los potenciales están extremadamente por encima de lo normado, resultando un verdadero peligro principalmente para la vida humana. A continuación se mostrarán dos variantes a implementar para eliminar dicho problema.

3.4.1 Eliminación del montículo de tierra.

Debido a la alta resistividad del terreno que conforma el montículo de tierra, una de las soluciones que se pudo implementar es la eliminación de este, e implementar una malla de 140m de lado mayor y 90 de lado menor, con cable 4/0, (figura 3.36) la cual cumple con los requerimientos de potenciales y resistencia que exigen las normas.

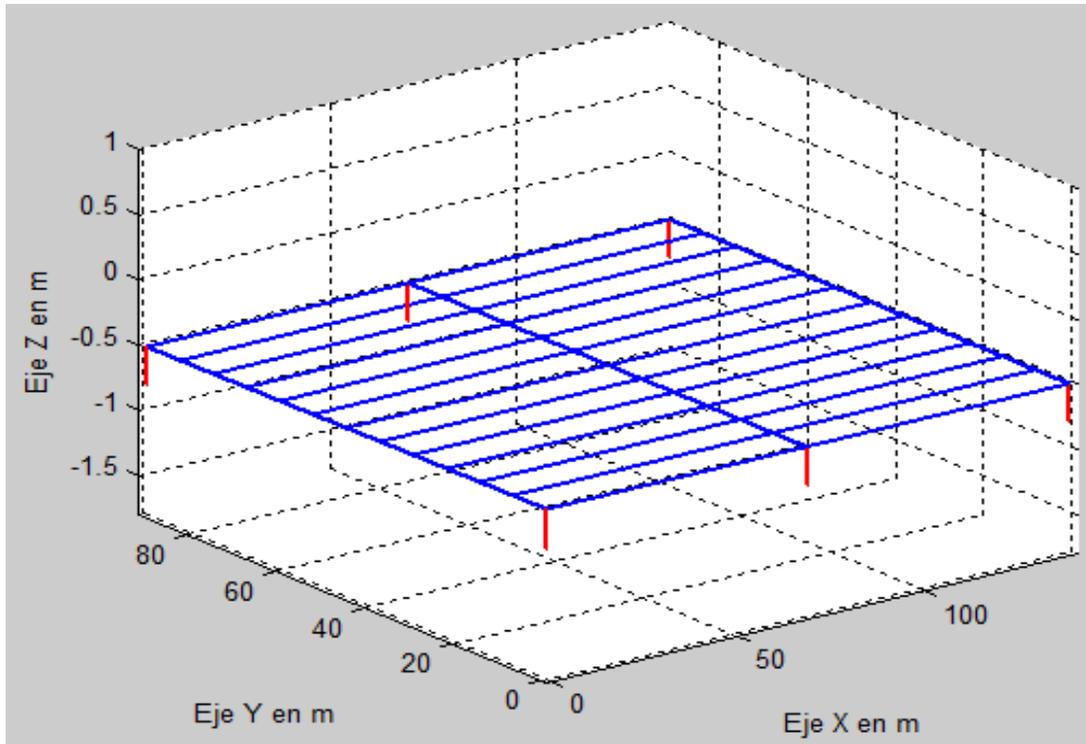


Figura 3.36 Configuración de electrodos malla 140*90.

Los potenciales de esta malla entran dentro de los valores tolerables, no presentando problema para la vida humana, factor fundamental, ni para los equipos que en ella se encuentran. En la figura 3.37 se muestran la tensión de contacto, que tiene un valor máximo de 249 V para un valor permisible de 270 V y un voltaje total de malla de 2486.

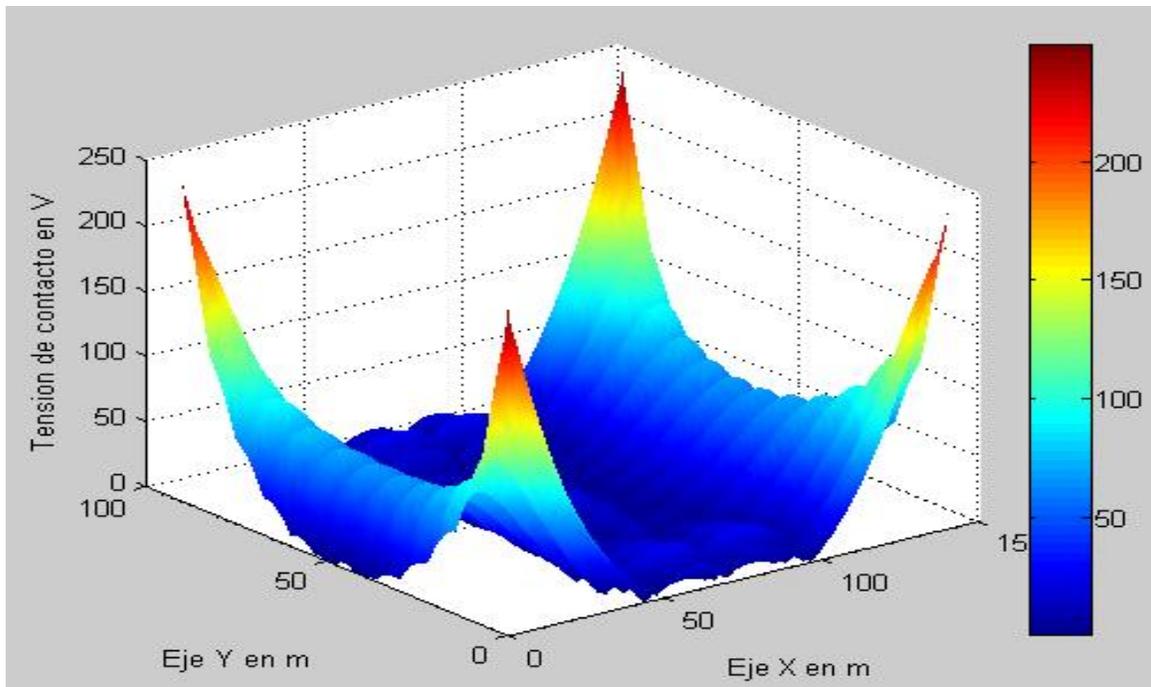


Figura 3.37 Potencial de contacto.

El potencial de paso (figura 3.38), también entra dentro de los valores permitidos. Esta malla presenta un potencial de paso máximo de 22.3 V para un valor permisible de 612 V.

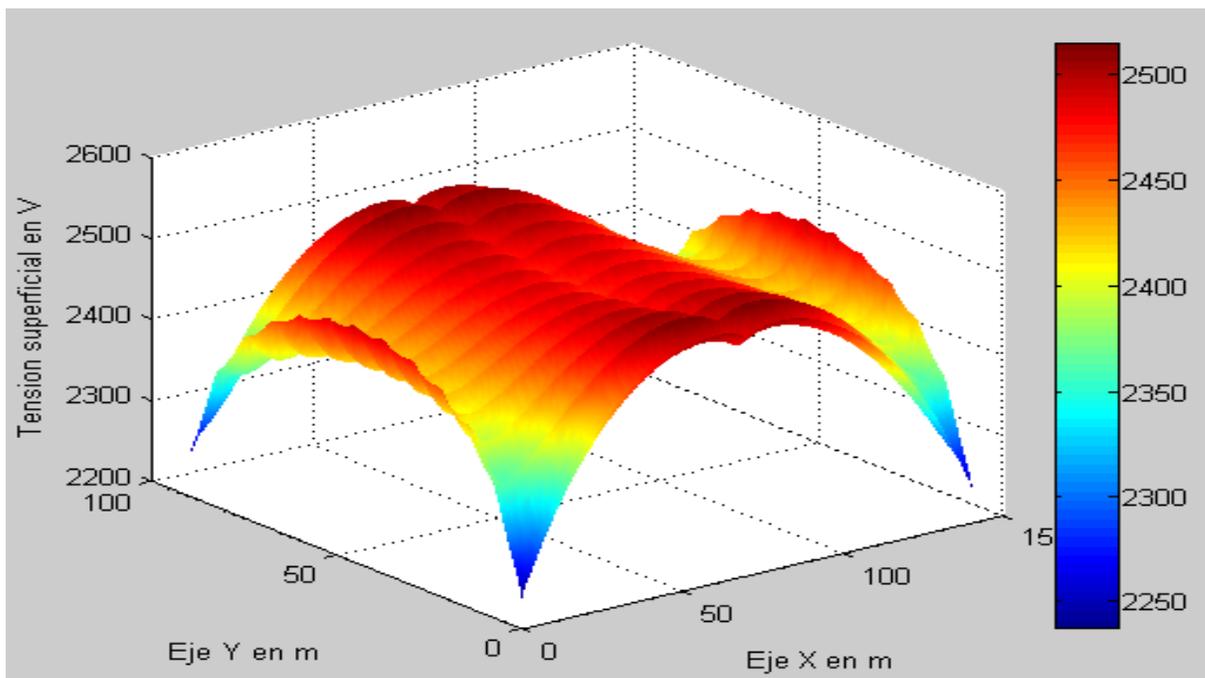
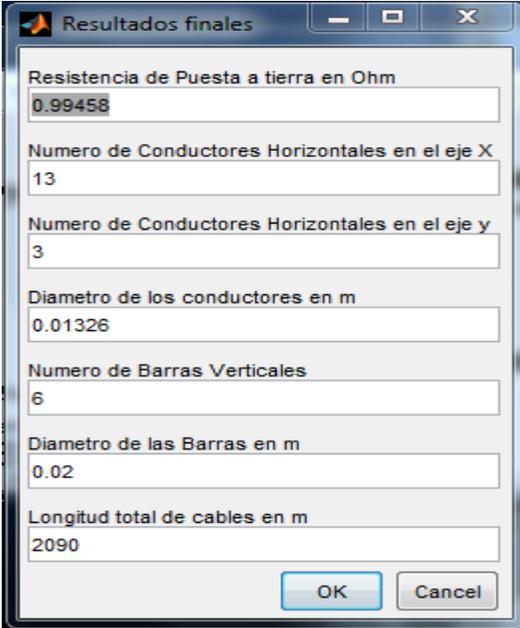


Figura 3.38 Potencial de paso.

La resistencia de esta malla tiene que estar por debajo de 1Ω , el establecido para subestaciones de 110/34.5, la cual se cumple (figura 3.39), garantizando la coordinación correcta de las protecciones.



The screenshot shows a window titled "Resultados finales" with the following data:

Parámetro	Valor
Resistencia de Puesta a tierra en Ohm	0.99458
Numero de Conductores Horizontales en el eje X	13
Numero de Conductores Horizontales en el eje y	3
Diametro de los conductores en m	0.01326
Numero de Barras Verticales	6
Diametro de las Barras en m	0.02
Longitud total de cables en m	2090

Figura 3.39 Resistencia de la malla.

3.4.2 Ampliación del montículo de tierra.

Otra variante posible pudo ser ampliar el montículo de tierra existente, siempre y cuando las condiciones de espacio lo permitan, se implementó una malla de 180m de lado mayor y 140m de lado menor, con cable 4/0 que cumple con las normas establecidas (figura 3.40).

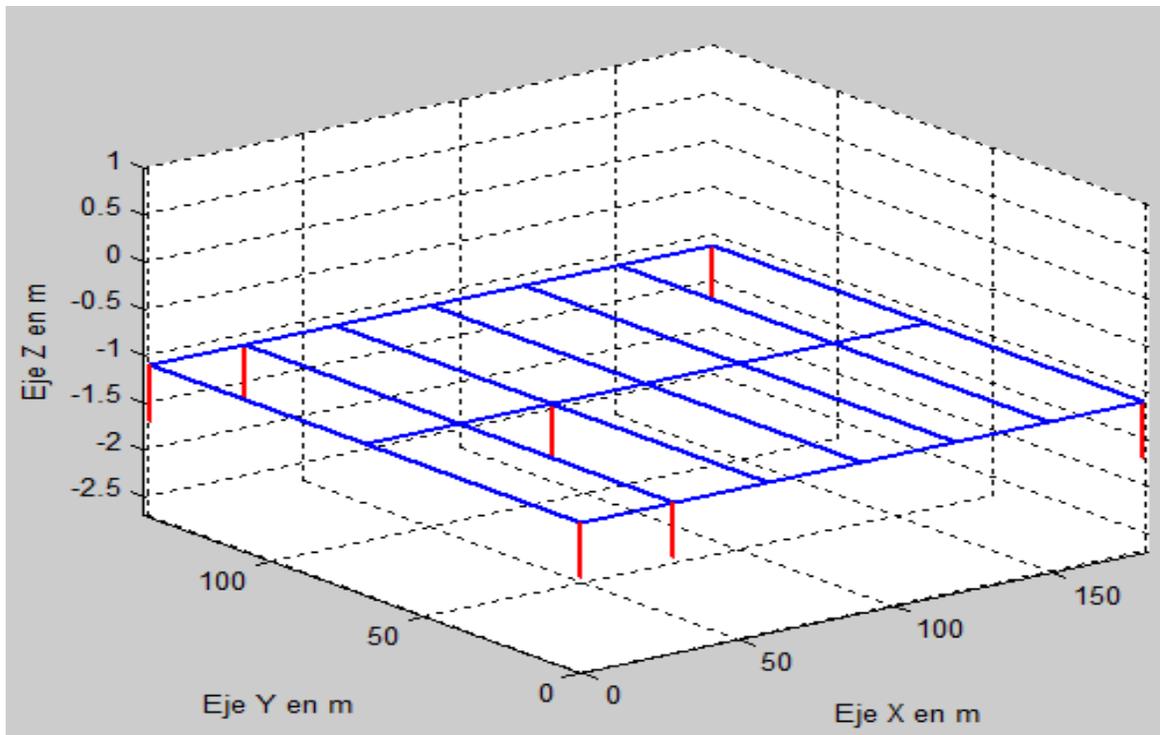


Figura 3.40 Configuración de electrodos.

Uno de los problemas fundamentales de la malla existente, es que no cumple con los potenciales de contacto ni de paso. La malla que se está dando como propuesta si los cumple y no presenta problemas para la vida humana ni para los equipos que en ella se encuentran. En la figura 3.41 se muestra una gráfica con el potencial de contacto, donde la máxima es 714 V, para un valor permisible de 734 V y una tensión total de malla de 2483 V.

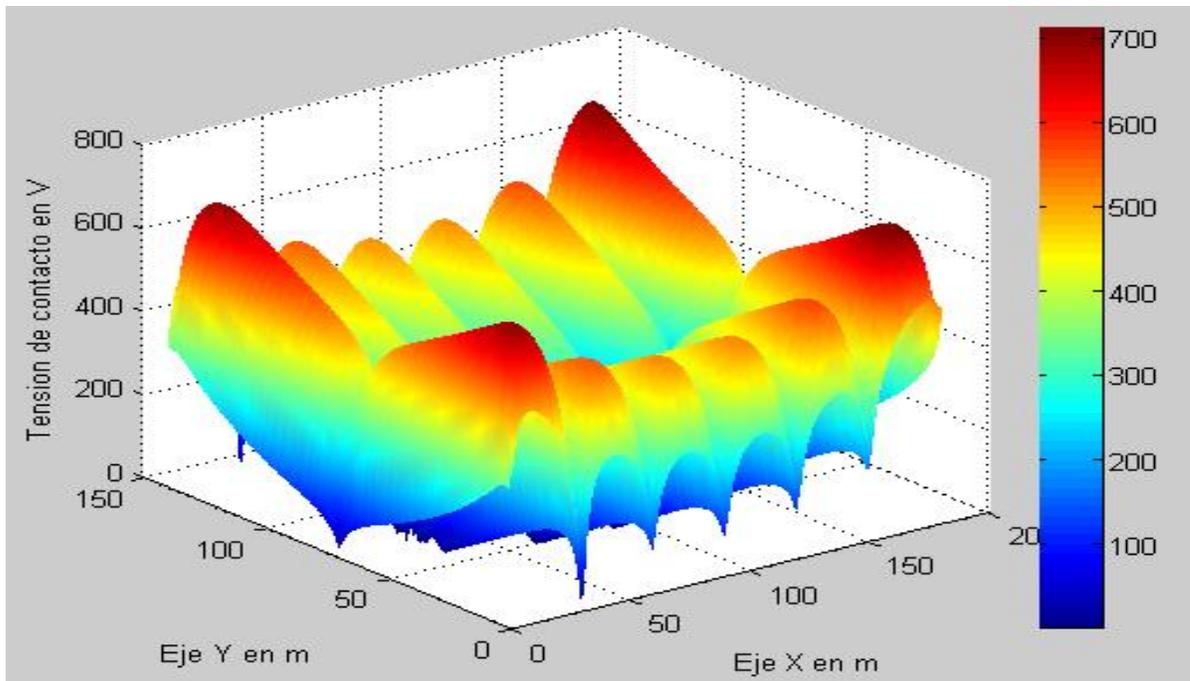


Figura 3.41 Potencial de contacto.

Los potenciales de paso (figura 3.42), también están dentro de las normas sin problema para el personal que visite u opere la subestación. Presenta un potencial máximo de 102.8 V, frente a un valor permisible de 2273.5 V.

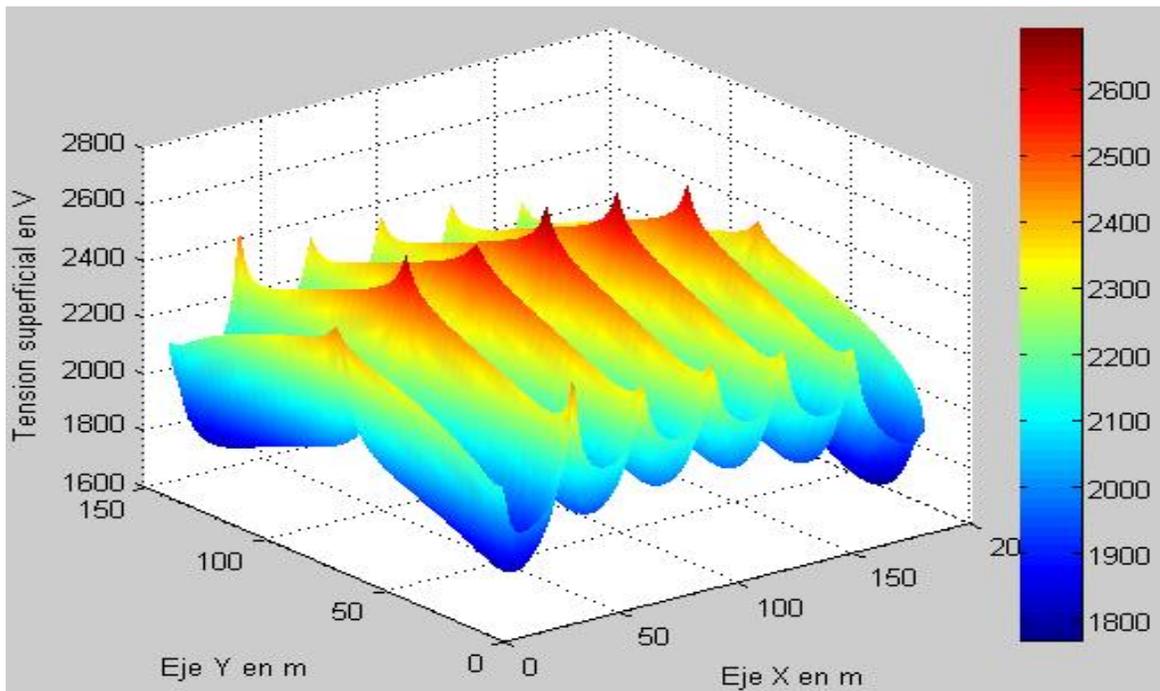
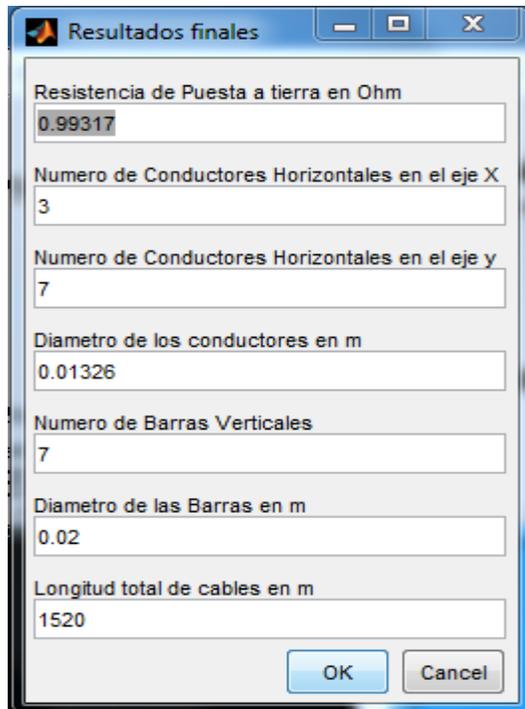


Figura 3.42 Potencial de paso.

La resistencia de esta malla está por debajo de los valores permisible para subestaciones de este voltaje (1Ω), lo cual se muestra en la figura 3.43.



The image shows a software window titled "Resultados finales" with a standard Windows-style title bar. The window contains several text input fields with the following values:

Parameter	Value
Resistencia de Puesta a tierra en Ohm	0.99317
Numero de Conductores Horizontales en el eje X	3
Numero de Conductores Horizontales en el eje y	7
Diametro de los conductores en m	0.01326
Numero de Barras Verticales	7
Diametro de las Barras en m	0.02
Longitud total de cables en m	1520

At the bottom of the window, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

Figura 3.43 Resistencia de puesta a tierra.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Al desarrollar este trabajo se arribaron a las conclusiones siguientes:

1. Entre los métodos evaluados para mejorar los potenciales y la resistencia de las mallas en explotación, los más efectivos y económicos son el de aumentar el área de la malla, que incide en ambos parámetros y el de utilizar electrodos verticales en terrenos de dos estratos cuando la resistividad del estrato inferior es menor que la del superior y la mayor parte de los electrodos verticales penetran este estrato.
2. Un método eficaz y económico de disminuir los potenciales es el empleo de elementos especiales en los módulos esquinas.
3. Las mallas de tierra de los grupos electrógenos analizados están extremadamente sobredimensionados, lo cual debe haber significado una inversión muy grande e innecesaria para el país.
4. El estudio realizado a la malla de la subestación de Camajuaní 110/34.5 kV, demuestra que no siempre se hacen los estudios de factibilidad que lleva toda obra constructiva.

Recomendaciones

- 1 Proponer a la Unión Eléctrica realizar mediciones de resistencia y potenciales a las principales subestaciones del país y evaluar la implementación de los metodos de mejora analizados en este trabajo.
- 2 Continuar insistiendo con la Unión Eléctrica en abandonar esa práctica común de ejecutar proyectos de puesta a tierra típicos, sin un fundamento técnico y sin tener en cuenta las características propias de cada instalación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gallego, Y.A., "Evaluación del estado actual de algunas instalaciones de puesta a tierra de la región central", in Centro de Estudios Electroenergéticos, 2010, UCLV: Santa Clara, Cuba. p. 6-15.
- [2] Diesendort. W, Insulation Coordination in High Voltage Electric Power System, Butterworth and Co. (Publishers) Ltd., 1974.
- [3] Harper.E, Elementos de diseño de subestaciones eléctricas, 1978.
- [4] IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants ANSI IEEE Std 141-1986, Chapter 7.
- [5] Ortuondo.P, Manual para el Proyecto y Análisis de Sistemas de Puesta a Tierra, Imprenta América Ltda. Chile, 1997.
- [6] Pesonen A.J., Separate or Bridged High-Voltage and Low- Voltage Earth Electrodes at Distribution Transformer Station, Electricity in Finland 40 (1967), No.3.
- [7] Valcárcel, Ángel C. "Sistemas de puesta a tierra y protección de equipos electrónicos sensibles". Monografía, Centro de Estudios Electroenergéticos, UCLV, Santa Clara, 2007.
- [8] Warrington, A.R. Van C., Protective Relays. Their Theory and Practice. Chapman and Hall Ltd, 1968.
- [9] Ingeniero Jaime Alberto Blandón. Boletín Técnico (GAMMA) No 16 de 2005.
- [10] Procobre. Mallas de tierra en edificaciones.

- [11] Ortuondo, P., "Manual para el Proyecto y Análisis de Sistemas de Puesta a Tierra", ed. Imprenta América Ltda. 1997, Chile.
- [12] Cedeño Lucart, I.A., "Estudio de los métodos utilizados en el diseño de puesta a tierra en las subestaciones eléctricas y líneas de transmisión para los niveles de tensión de 400kv, 230kv, 115kv y 34.5kv en cadafe", in Departamento de Electricidad,. Abril de 2009, Universidad de Oriente: Barcelona.
- [13] Ingeniero Jaime Alberto Blandón. Estado del arte en el diseño de mallas a tierra de subestaciones. Boletín técnico número 16 del 2005
- [14] Warrington A R, C.V., "Protective Relays. Their Theory and Practice", ed. Chapman and Hall. 1968.
- [15] Electricidad, C.F., "Redes de tierra para estructuras de líneas de transmisión aéreas de 69 a 400 kV", in Definiciones. 1999: México. p. 1-2.
- [16] Tagg, G.T., Earth Resistances. Pitman Publishing Corporation. 1964, London.
- [17] Ibarra, R.D., "Interpretación de Curvas de Resistividad Aparente para más de dos Estratos", in Departamento de Electroenergética. 2010, UCLV: Santa Clara, Cuba p. 4-11.
- [18] Curso SPT CIMEMOR – Tenciones de paso y contacto Dr. Arturo Galván Diego. (Potenciales tolerables por el cuerpo humano)
- [19] Puesta a tierra M.Sc. Guillermo Aponte Mayor julio 2009 p. 13-18.
- [20] Ing. Ángel Reyna y Asociados SRL. Representante de DEHN & SÖHNE en la Argentina. Corrosión de electrodos de puesta a tierra. 2nd edición; Septiembre. 2007.

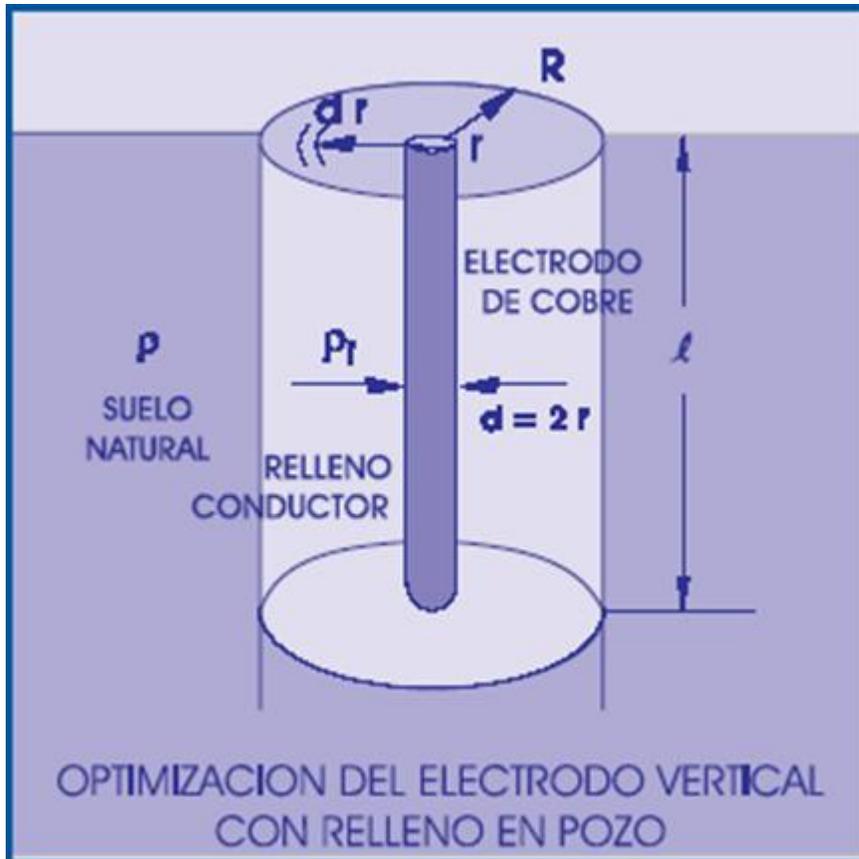
ANEXOS

Anexo I Electrodo vertical en medio artificial.

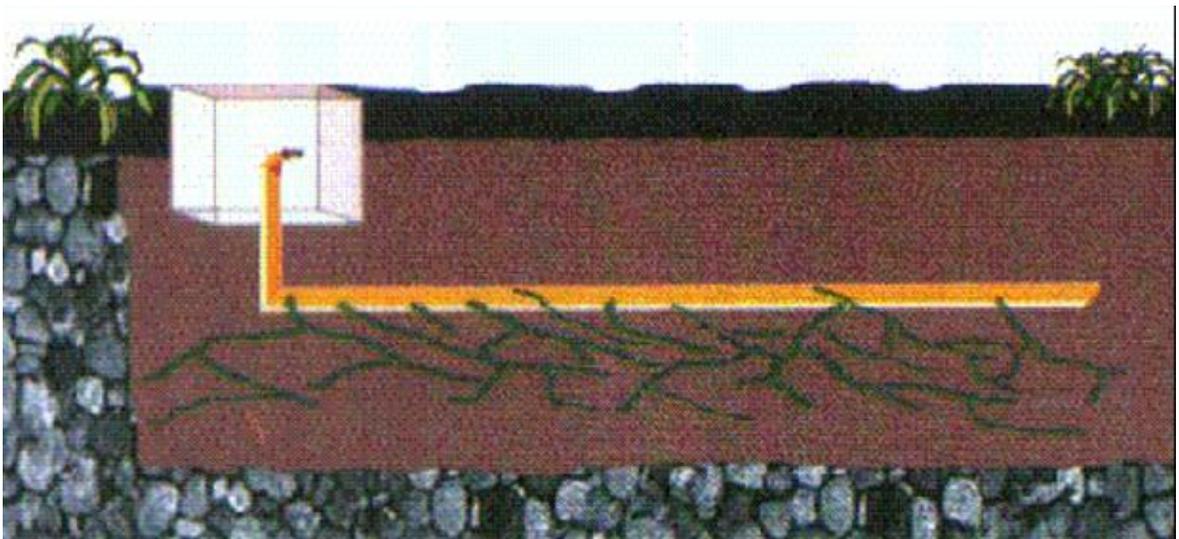
Con la finalidad de disminuir la resistencia de puesta a tierra de un electrodo vertical se puede situar el mismo en un medio artificial, para lo cual se hace un hueco en el centro del cual va el electrodo y el resto se rellena de un material de más baja resistividad que la tierra circundante. En este caso la resistencia de puesta a tierra está dada por:

$$R = \frac{1}{2\pi L} \left[(\rho - \rho_c) \ln \left(\frac{8L}{D} - 1 \right) + \rho_c \ln \left(\frac{8L}{d} - 1 \right) \right]$$

Donde: ρ - Resistividad del suelo (Ω -m), ρ_c - Resistividad del material del relleno (Ω -m), d - Diámetro del electrodo (m), D - Diámetro del relleno (m), L - Profundidad del electrodo (m).



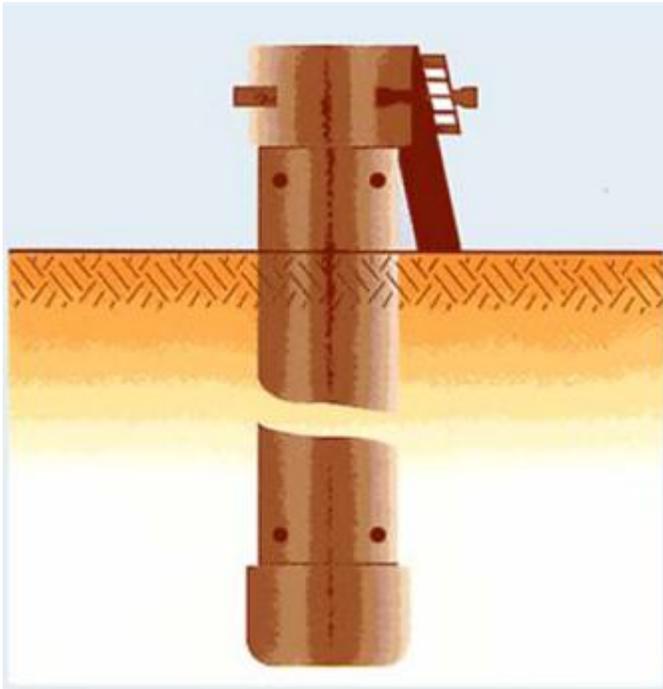
Anexo II Tratamiento de los suelos para disminuir resistencia eléctrica.



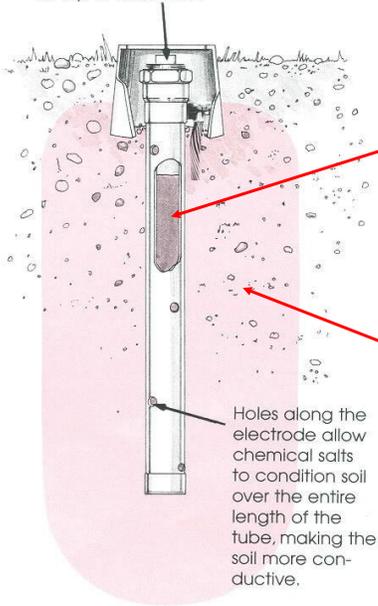


Anexo III Electrodo artificial.

Consiste de un tubo de cobre llenado parcialmente con sales o sustancias conductivas, con perforaciones en los extremos superior (para ventilación) e inferior (para drenaje) y sellados ambos extremos con tapas.



Chem-Rod is easily inspected and recharged through cap at top of electrode



ELECTRODOS CHEM ROD

Compuesto de salino

Compuesto arcilla y carbón

