



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Estudios Electroenergéticos

TRABAJO DE DIPLOMA

Optimización de Sistemas de Puesta a Tierra

Autor: Enrique Diaz-Guzmán Garí

Tutor: Dr. Ángel C. Valcárcel Rojas

Santa Clara

2010

"Año 52 de la Revolución"



Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Estudios Electroenergéticos



TRABAJO DE DIPLOMA

Optimización de Sistemas de Puesta a Tierra

Autor: Enrique Diaz-Guzmán Garí

dggari@uclv.edu.cu

Tutor: Dr. Ángel C. Valcárcel Rojas

Profesor Titular, Centro de Estudios Electroenergéticos,
Facultad de Eléctrica, valca@uclv.edu.cu

Consultante: MSc. Alberto Limonte Ruiz

Profesor Auxiliar, Departamento de Electroenergética, Facultad de
Eléctrica, limonte@uclv.edu.cu

Santa Clara

2010

"Año 52 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 Eléctrica, 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

*"Vive, como si fueras a morir mañana.
Aprende, como si fueras a vivir siempre"*

Mahatma Gandhi

*A aquellas personas que confiaron en mí aun en los
momentos más difíciles.*

*A mi abuela María, el ejemplo más grande de sacrificio, amor
y entrega que he conocido. Siempre estará presente en mi
corazón.*

A toda mi familia, en especial a mi hermano Kirk.

A mi mamá, Roly y a mi hermana.

A Mercedes, la Gallega, Nancy y en especial a Deysi por toda su dedicación y amor.

A mis tíos Sergito, Cristóbal, Saavedra y Roger.

A mis hermanos de la vida Papucho y Albertico.

A mi abuelo Garí.

A mis primos y primas por estar siempre presentes y a Osmani mi padrino.

A todos mis compañeros de aula y mis amigos que compartieron todo este tiempo conmigo, en especial a Carlos Luis.

A mi novia Yaimeé por todo su amor, comprensión y ayuda.

A mis suegros Vivian y Reinaldo.

A Juanito y a Olga mi madrina

Especialmente a Esther María, Miguel, Angelito, Marta Rosa y Miguel Ángel.

A Misladys y a mi sobrinita Isabelita.

A Raxel, Alejandro, César y Yordan, mis amigos de la infancia.

A mis tutores Valcárcel y Limonte.

TAREA TÉCNICA

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

1. Estudio del estado actual de optimización en el programa PAST.
2. Valorar posibles métodos de optimización y definir cual se va a usar.
3. Desarrollar modelo de optimización.
4. Proponer ejemplos de mallas de tierra.
5. Comparación entre el programa PAST y la metodología propuesta por la IEEE en su Std.80/2000.
6. Análisis de los resultados.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

El método aproximado propuesto por la IEEE en su Std 80 del 2000 es de gran aceptación en el mundo, ya que permite el diseño de mallas de tierra de reticulado uniforme, o sea igual separación entre conductores por ambos lados de la malla, aunque el diseño de mallas de tierra se puede realizar tanto con métodos aproximados como con métodos exactos o semiexactos. En este trabajo se presenta un programa desarrollado en MatLab que utilizando el método de las imágenes de Maxwell (método semiexacto), permite inicialmente el diseño de una malla de reticulado uniforme, pero buscando optimizar la cantidad de conductores necesarios para cumplir con las condiciones de potenciales de paso y contacto. Una segunda opción de optimización realiza una redistribución óptima de los conductores desde los extremos hacia el centro, buscando igualar los potenciales de contacto en todas las cuadrículas de la malla y cumpliendo con las condiciones de permisibilidad. Esto puede permitir una reducción adicional en la cantidad de conductores y por tanto de excavaciones en el terreno lo que implica una disminución en los costos de materiales a utilizar en un diseño de tan alta importancia como lo es una malla de puesta a tierra.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	¡Error! Marcador no definido.
DEDICATORIA	¡Error! Marcador no definido.
AGRADECIMIENTOS	¡Error! Marcador no definido.
TAREA TÉCNICA	iv
RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	3
REVISIÓN Y ANÁLISIS DE LA BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.....	3
1.1 Introducción.	3
1.2 Modelos de optimización.	4
1.2.1 Modelo y modelado.....	4
1.3 Etapas en el desarrollo de un modelo.....	5
1.3.1 Identificación del problema.....	6
1.3.2 Especificación matemática y formulación.....	6
1.3.3 Resolución.....	7
1.3.4 Verificación, validación y refinamiento.....	7
1.3.5 Interpretación y análisis de los resultados.....	8
1.3.6 Implantación, documentación y mantenimiento.....	8
1.4 Cálculo de la malla de puesta a tierra de una subestación según la NORMA Std 80 del 2000 de la IEEE.....	8
1.4.1 Requisitos de una malla a tierra.....	8
1.4.2 Tensión de paso y contacto permisibles.....	9

1.4.3	Diseño de una malla a tierra.....	10
1.4.4	Selección del conductor de la malla.....	10
1.4.5	Tensiones reales de paso y contacto.....	11
1.4.6	Determinación de los coeficientes K_m , K_i , K_s	12
1.4.7	Valor de la resistencia de puesta a tierra.....	12
CAPÍTULO 2.....		14
2.1	Introducción.....	14
2.2	Determinación de la cantidad de conductores en el diseño de una malla.....	14
2.3	Optimización de mallas de puesta a tierra.....	18
2.4	Valores de α_A y α_B para una malla rectangular.....	21
2.5	Optimización de sección del conductor y profundidad de enterramiento.....	24
CAPÍTULO 3.....		28
3.1	Introducción.....	28
3.2	Costos de diseño de una malla de tierra.....	28
3.3	Diseño de mallas de tierra por ambos métodos.....	29
3.3.1	Costo de los elementos para cada configuración de malla.....	333
3.4	Propuesta de 5 ejemplos de mallas de tierra para su comparación con el método de la IEEE.....	37
3.4.1	Malla de 110x 100 m ²	37
3.4.2	Malla de 140x 100 m ²	42
3.4.3	Malla de 160x 100 m ²	47
3.4.4	Malla de 180x 100 m ²	52
3.4.5	Malla de 200x 100 m ²	57

3.5 Conclusiones del capítulo.	62
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
Conclusiones	64
Recomendaciones	644
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	655

INTRODUCCIÓN

La necesidad de una referencia a tierra en los sistemas eléctricos de alta tensión viene dada por las experiencias y análisis que explicaron las dificultades y desventajas que estos presentaron cuando se pretendía que fueran a operar aislados de tierra. Lo que trajo consigo el surgimiento y desarrollo de métodos matemáticos de determinación de la resistencia de contacto con el terreno de los sistemas de puesta a tierra. La complejidad de estos métodos obligó a buscar soluciones que aunque fuesen aproximadas cumplieran con las condiciones y requisitos necesarios, dando paso a una serie de métodos aproximados que brindan una solución rápida y una exactitud aceptable desde el punto de vista práctico, que aún hoy tienen amplia utilización. Prestigiosas instituciones como la IEEE en su norma Std 80 del 2000 propone un método que se ha ido perfeccionando con los años pero no deja de ser un método aproximado. El desarrollo alcanzado por los medios de computo, ha permitido retomar métodos exactos como el de las imágenes de Maxwell y el desarrollo de otros nuevos utilizando fundamentalmente métodos numéricos que permiten no solo una mayor exactitud en los cálculos sino también la posibilidad de optimización de la cantidad de conductores a enterrar y por tanto también de las excavaciones necesarias. El método de la IEEE realiza el diseño solo de mallas rectangulares de reticulado uniforme en toda su área, mientras que el método propuesto permite diseños más complejos que mejoran los niveles de potenciales superficiales y de contacto, optimizan el diseño o se restringen a un área de dimensiones y formas determinadas. El objetivo general del trabajo está encaminado a determinar la malla más óptima en cuanto al proyecto económico, cumpliendo con lo normado en cuanto a resistencia de puesta a tierra y potenciales de paso y contacto, y además hacer una comparación entre el método propuesto con el método que propone la IEEE en su norma Std 80 del 2000.

El trabajo está estructurado de la siguiente forma:

En el capítulo 1 se realiza una descripción y análisis de la bibliografía consultada.

En el capítulo 2 se describe la metodología de optimización en que se basa el PAST.

En el Capítulo 3 se muestra los resultados obtenidos y se hace una comparación con la metodología de la IEEE.

CAPÍTULO 1.

REVISIÓN Y ANÁLISIS DE LA BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.

1.1 Introducción.

Hoy en día, prácticamente todos los sistemas se proyectan para operar sólidamente conectados a tierra. Desde los primeros inicios se fueron desarrollando métodos de proyecto y análisis de sistemas de puesta a tierra, que por la complejidad del asunto implicaban procedimientos matemáticos muy laboriosos para la época, lo que obligó a recurrir a métodos que aunque aproximados cumplieran con las exigencias de la práctica laboral. Las instalaciones eléctricas de cualquier tipo, por razones de seguridad para el personal que las opera, es necesario que mantengan el menor potencial posible respecto a tierra, tanto bajo condiciones de operación normales como bajo condiciones de falla. 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. El valor de la resistencia de la puesta a tierra debe ser lo más pequeño posible a fin de limitar la tensión. Sin embargo, una puesta a tierra no puede considerarse buena, solo por presentar un bajo valor de resistencia, 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.

1.2 Modelos de optimización.

1.2.1 Modelo y modelado.

Modelo: *Esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja (por ejemplo, la evolución económica de un país), que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento.*

Un modelo es una representación matemática simplificada de una realidad compleja. Modelar es la acción de construir un modelo, de encorsetar la realidad. Implica la relación entre dos figuras (no necesariamente encarnadas por personas únicas sino por equipos): el *modelador* (encargado de la especificación y desarrollo del modelo) y el *experto* sobre la realidad (conocedor del problema real). La mayoría de las veces, el desarrollo de un modelo puede involucrar a un equipo multidisciplinar compuesto por matemáticos, estadísticos, ingenieros, economistas, psicólogos, etc. que aportan diferentes perspectivas y conocimiento en la representación de la realidad. Un modelo debe equilibrar la necesidad de contemplar todos los detalles con la factibilidad de encontrar técnicas de solución adecuadas. Un modelo es, en definitiva, una herramienta de ayuda a la toma de decisiones. Por esta razón, sus resultados deben ser inteligibles y útiles. Modelar se puede entender simultáneamente como *ciencia* y como *arte*. Es una ciencia pues se basa en un conjunto de procesos estructurados: análisis y detección de las relaciones entre los datos, establecimiento de suposiciones y aproximaciones en la representación de los problemas, desarrollo o uso de algoritmos específicos de solución. Es un arte porque materializa una visión o interpretación de la realidad no siempre de manera unívoca. Cada persona imprime su estilo en el modelo mismo y en la especificación, en el desarrollo y en la documentación. Características tales como elegancia o simplicidad pueden atribuirse a un modelo. El desarrollo de un modelo es una creación hecha con ayuda de ciencias básicas o herramientas de apoyo. Entre los beneficios explícitos o implícitos, tanto para el modelador como para el experto, derivados del proceso de modelado además del modelo en sí mismo, se pueden mencionar:

- Ayuda a establecer un diálogo con intercambio de información entre el modelador y el experto
- Organiza los datos, la información disponible sobre el sistema.
- Organiza, estructura y mejora la comprensión del sistema.
- Internaliza la estructura organizativa de la empresa.
- Permite compartir supuestos y resultados entre el modelador y el experto.
- Proporciona un entorno ágil para el análisis y la sensibilidad.
- Indica la dirección de mejora en las decisiones.

En este capítulo se hace un análisis de diferentes modelos de optimización, es decir, aquéllos donde existe un conjunto de *variables* de decisión que deben maximizar/minimizar una *función objetivo* sometidas a un conjunto de *restricciones*. Los modelos de programación lineal son más utilizados que todos los otros tipos de optimización juntos y abarcan cualquier tipo de actividad humana como micro y macroeconomía, finanzas, marketing, economía de la energía, organización de la producción, planificación de la operación, selección de procesos, asignación de tareas, ingeniería química, forestal, agrónoma, comercio internacional, desarrollo económico, etc. Como referencias generales de modelado de problemas de optimización que se pueden utilizar en la enseñanza de pregrado o postgrado cabe citar en [1].

1.3 Etapas en el desarrollo de un modelo.

Las etapas que componen el *ciclo de vida* de un modelo son las siguientes:

- Identificación del problema
- Especificación matemática y formulación
- Resolución
- Verificación, validación y refinamiento
- Interpretación y análisis de los resultados
- Implantación, documentación y mantenimiento.

1.3.1 Identificación del problema.

Consiste en la recolección y análisis de la información relevante para el problema, en el intercambio de información entre el modelador y el experto, en establecer una relación simbiótica y una estrecha coordinación entre ambos. Los problemas reales suelen estar definidos en términos vagos e imprecisos. Se debe hacer la tarea de traducción o interpretación en frases precisas, convertibles en ecuaciones matemáticas. En esta etapa se establecen y documentan los supuestos realizados que en etapas posteriores deberán ser validados. Esta etapa es fundamental para que las soluciones proporcionadas, las conclusiones obtenidas sean útiles, las decisiones adoptadas sean correctas. Los datos suelen ser vitales para conseguir un realismo o aplicabilidad en las soluciones. A menudo representan el cuello de botella del proceso de modelado.

1.3.2 Especificación matemática y formulación.

Escritura matemática del problema de optimización, definiendo sus variables, sus ecuaciones, su función objetivo, sus parámetros. En esta etapa se analiza el tamaño del problema, la estructura de la matriz de restricciones, su tipo (LP, MIP, NLP). Es una etapa de creación donde se debe prestar especial atención a la precisión en la formulación y a la escritura de las ecuaciones que describen el problema. Hay que tener en cuenta, además, que existen diversas alternativas de modelado (especialmente en programación entera) que afectan de manera fundamental en la resolución del mismo, existiendo un desarrollo cada vez mayor en la reformulación de problemas. La caracterización de un problema LP según su tamaño resulta difícil y ha sufrido un gran cambio desde los recientes desarrollos de algoritmos simples mejorados y, sobre todo, desde la aparición de los métodos de punto interior. En la tabla 1.1 se propone una clasificación de tipos de problemas LP según su tamaño. Esta clasificación debe ser tomada como guía o referencia relativa actual pero téngase en cuenta que los tamaños relativos de los problemas cambiarán conforme evolucionen los códigos de optimización. Actualmente se puede afirmar que los códigos de optimización lineal implantan algoritmos muy eficientes, son fiables y numéricamente robustos, y están ampliamente disponibles.

Tabla 1.1 Tipos de problemas LP según su tamaño

	Restricciones	Variables
Caso Ejemplo	100	100
Tamaño Medio	10000	10000
Gran Tamaño	100000	100000
Muy Gran Tamaño	> 100000	> 100000

En lo referente a MIP o NLP ni siquiera se pueden dar criterios generales de tamaño ya que la dificultad de resolución no tiene por qué estar ligada al tamaño del problema, siendo incluso preferible reformular un problema aunque aumenten las dimensiones, para lograr una resolución más eficiente.

1.3.3 Resolución.

Se trata de implantar un algoritmo de obtención de la solución numérica (muy próxima a la matemática) óptima o cuasióptima. El algoritmo puede ser de propósito general (método simplex) o específico. Puede haber diferentes métodos de solución de un problema o diferentes implantaciones de un mismo método. El tiempo de resolución de un problema también puede depender drásticamente de su formulación. La solución óptima debe ser suficientemente satisfactoria, debe ser una guía de actuación para el experto.

1.3.4 Verificación, validación y refinamiento.

Esta etapa conlleva la eliminación de los errores en la codificación, es decir, conseguir que el modelo haga lo que se desea (depurar y verificar). Es necesario comprobar la validez de las simplificaciones realizadas a través de los resultados obtenidos, incluso contrastando éstos con situaciones reales ya transcurridas (validar). Esta etapa de verificación, validación, comprobación da lugar a nuevas necesidades de modelado para mejorar la capacidad de representación de la realidad, a nuevos refinamientos indicados por el usuario.

1.3.5 Interpretación y análisis de los resultados.

Esta etapa consiste en proponer soluciones. Permite conocer en detalle el comportamiento del modelo al hacer un análisis de sensibilidad en los parámetros de entrada, estudiar diferentes escenarios plausibles de los parámetros, detectar soluciones alternativas cuasióptimas pero suficientemente atractivas, comprobar la robustez de la solución óptima.

1.3.6 Implantación, documentación y mantenimiento.

Es una etapa fundamental del desarrollo de un modelo para garantizar su amplia difusión. La documentación ha de ser clara, precisa y completa. El manual de usuario debe incluir la especificación técnica funcional, matemática e informática. El propio código debe incluir una buena documentación para facilitar la tarea del mantenimiento. Piénsese que la mayor parte del ciclo de vida de un modelo no está en el desarrollo sino en la fase de uso y mantenimiento. En esta etapa se incluye también la tarea de formación para los usuarios del modelo.

1.4 Cálculo de la malla de puesta a tierra de una subestación según la NORMA Std 80 del 2000 de la IEEE.

La IEEE en su Std. 80 del 86 y 2000 propone una metodología para el diseño de mallas de tierra de subestaciones, las cuales han sido y son de amplia utilización en el mundo a pesar de que como se mencionó anteriormente se basa en un método aproximado.

El método de la IEEE en su Std. 80 del 1986 y la del 2000 es muy parecido, el principio es el mismo solo que la versión del 2000, con el objetivo de buscar mayor exactitud, incluye nuevas variables que implican cambios en algunas expresiones. En los siguientes epígrafes se da una descripción de la metodología propuesta en la versión de 1986. [2] [3]

1.4.1 Requisitos de una malla a tierra.

Los requisitos que debe cumplir una malla de puesta a tierra son los siguientes:

- Debe tener una resistencia tal, que el sistema se considere sólidamente puesto a tierra.

- La variación de la resistencia, debido a cambios ambientales, debe ser despreciable, de manera que la corriente de falla a tierra, en cualquier momento, sea capaz de producir el disparo de las protecciones.
- Impedancia de onda de valor bajo para fácil paso de las descargas atmosféricas.
- Debe conducir las corrientes de falla sin provocar gradientes de potencial peligrosos entre sus puntos vecinos.
- Al pasar la corriente de falla durante el tiempo máximo establecido de falla, (es decir disparo de respaldo), no debe haber calentamientos excesivos.
- Debe ser resistente a la corrosión.

1.4.2 Tensión de paso y contacto permisibles.

TENSIÓN DE PASO

Es la diferencia de potencial entre dos puntos de un terreno que pueden ser tocados simultáneamente por una persona (Figura 1.1); su valor permisible está dado por:

$$E_p = \frac{165 + \rho_s}{\sqrt{t}} \quad (1)$$

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

Es la diferencia de potencial entre un punto en la superficie del terreno y cualquier otro punto que pueda ser tocado simultáneamente por una persona (Figura 1.1); su valor permisible está dado por:

$$E_t = \frac{165 + 0.25 \rho_s}{\sqrt{t}} \quad (2)$$

Donde:

E_t = Tensión de contacto permisible en voltios.

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

t = Duración máxima de falla en segundos.

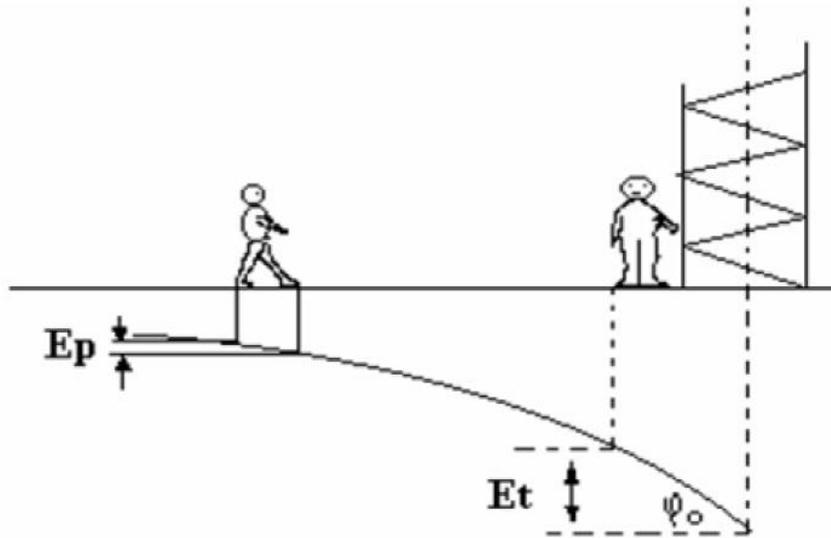


Figura 1.1. Tensión de paso E_p y de contacto E_t .

1.4.3 Diseño de una malla 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.

1.4.4 Selección del conductor de la malla.

Para calcular la sección del conductor se aplica la siguiente ecuación:

$$Ac = I \left[\frac{33t}{\log \left(\frac{Tm - Ta}{234 + Ta} + I \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Donde:

Ac = Sección del conductor (CM).

I = Corriente máxima de falla (Amp.)

Tm = Temperatura máxima en los nodos de la malla (450°C con soldadura y 250°C con amarre pernado.)

Ta = Temperatura ambiente (°C).

t = Tiempo máximo de despeje de la falla (seg.).

Sin embargo, la sección mínima recomendable es 2/0 AWG para la malla y 5/8" para las varillas, estos valores mínimos están de acuerdo con prácticas internacionales.

1.4.5 Tensiones reales de paso y contacto.

La tensión de paso real en una subestación está dada por:

$$Ep = k_s \cdot k_i \frac{\rho I}{L} \quad (4)$$

Donde:

Ep = Tensión de paso real en voltios.

Ks = Coeficiente que tiene en cuenta, la influencia combinada de la profundidad y del espaciamiento de la malla.

Ki = Coeficiente de irregularidad del terreno.

ρ = Resistividad del suelo (Ω -m)

I = Corriente máxima de falla (Amp)

L = Longitud total del conductor (m)

La tensión de contacto real está dada por:

$$Et = k_m \cdot k_i \frac{\rho I}{L} \quad (5)$$

Donde:

Et = Tensión de contacto en voltios.

Km. = Coeficiente que tiene en cuenta las características geométricas de la malla.

1.4.6 Determinación de los coeficientes Km., Ki., Ks.

Para la determinación de los coeficientes es necesario tener en cuenta las siguientes definiciones:

A= Longitud de la malla (m).

B= Ancho de la malla (m).

L= Longitud total del conductor (m).

n= Número de conductores en paralelo de longitud A

m= Número de conductores en paralelo de longitud B.

D= Espaciamiento entre conductores (m).

h= Profundidad de enterramiento (m).

d= Diámetro del conductor (m)

La longitud total del conductor está dada por:

$$L = n \cdot A + m \cdot B \quad (6)$$

Km. es:

$$k_m = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{D^2}{16hd}\right) + \frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{7}{8} \cdots\right)_{n-2 \dots \text{terminos}} \quad (7)$$

Ki es:

$$K_i = 0.65 + 0.172n \quad n \leq 7 \quad K_i = 2.0 \quad n > 7 \quad (8)$$

es:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots \right) \quad (9)$$

1.4.7 Valor de la resistencia de puesta a tierra.

El cálculo de la resistencia de puesta a tierra se puede hacer por el método de Laurent y Niemann o por el método de Dwinght.

MÉTODO DE LAURENT Y NIEMANN

Este método es bastante aproximado y la expresión para el cálculo es:

$$R = 0.443\rho \left(\frac{1}{\sqrt{A\gamma}} + \frac{1}{L} \right) \quad (10)$$

Donde:

R = Resistencia en ohmios.

$A\gamma$ = Área de la malla de puesta a tierra en m²

ρ = Resistividad del suelo (Ω -m)

L = Longitud total del conductor (m).

La ecuación anterior es una aproximación y su resultado siempre es mayor que el valor real.

[4] [3]

CAPÍTULO 2.

DISEÑO ÓPTIMO DE MALLAS DE PUESTA A TIERRA DE SUBESTACIONES.

2.1 Introducción.

El desarrollo alcanzado por los sistemas de cómputo, ha permitido la implementación de programas para el proyecto y análisis de sistemas de puesta a tierra, basados en algoritmos matemáticos de gran exactitud desarrollados hace muchos años, pero su complejidad impide su desarrollo y aplicación más extensiva, dando lugar a numerosos métodos aproximados, que si bien han garantizado resultados aceptables desde el punto de vista práctico, sus inherentes errores son razón suficiente que justifica no continuar aplicándolos. El método de las imágenes de Maxwell aplicado al proyecto y análisis de sistemas de puesta a tierra, es un método que pudiera clasificarse como semiexacto, que permite el diseño de sistemas de gran complejidad considerando tanto la existencia de terrenos de resistividad homogénea como de terrenos multiestratificados, garantizando niveles de exactitud que comparados por ejemplo con el método propuesto por la IEEE para el diseño de mallas de tierra de subestaciones, en su norma STD 80 del 2000, en dependencia de las dimensiones de la malla puede reducir errores de hasta un 20%. Por otra parte este método de la IEEE realiza el diseño solo de mallas rectangulares de reticulado uniforme en toda su área.

2.2 Determinación de la cantidad de conductores en el diseño de una malla.

Es conveniente seguir algunas pautas generales para diseñar una malla de tierra en cuanto a la cantidad de módulos a utilizar en cada dirección. El objetivo principal es que la malla

cumpla con el requisito de poseer en su interior niveles de tensión de paso (U_{paso}) y de contacto (U_{cont}) inferiores a los tolerables (U_{tol}), pero no demasiado inferiores, para no realizar un proyecto sobredimensionado con costos muy superiores a los necesarios. Además, el valor aceptable de sollicitación máxima debe obtenerse con un diseño que minimice el costo de construcción.

Considerando que el diseño de la malla está determinado por las tensiones de contacto, el primer paso es determinar el valor tolerable correspondiente. Para ello se suponen conocidos el tiempo de duración de la falla, la resistividad del estrato superior del terreno y del material artificial agregado, este último se puede asumir con un valor normal de 3000 $\Omega \cdot \text{m}$. A continuación, deben definirse la profundidad de enterramiento y el diámetro del conductor empleado. También, dependiendo del tamaño de la malla, debe tenerse presente a priori si se complementará o no el diseño utilizando barras verticales o elementos adicionales en los módulos esquinas de la malla.

El paso siguiente es a partir de una configuración inicial estimada, solo utilizando elementos horizontales, sin barras; por ejemplo una configuración básica perimétrica, que abarque el área a proteger. A continuación, se incrementa en forma adecuada la cantidad de conductor de la malla hasta obtener el valor de sollicitación aceptable. La figura 2.1 muestra este proceso.

En este sentido es bueno señalar algunas consideraciones importantes: Para similares longitudes de conductor total, las configuraciones con módulos alargados en las direcciones del lado mayor o menor de la malla, tienen menores valores de sollicitación que las configuraciones con módulos más cuadrados. En mallas de dimensiones medianas a mayores, las barras no son una solución económica para reducir las sollicitaciones de tensión. Lo anterior es válido, en mayor medida, si se trata de terrenos homogéneos. Para un terreno estratificado con capas inferiores de menor resistividad que la que contiene a los conductores y alcanzables con las barras, el efecto reductor en las tensiones de paso y contacto puede ser importante ya que contribuye a disminuir el potencial de la malla.

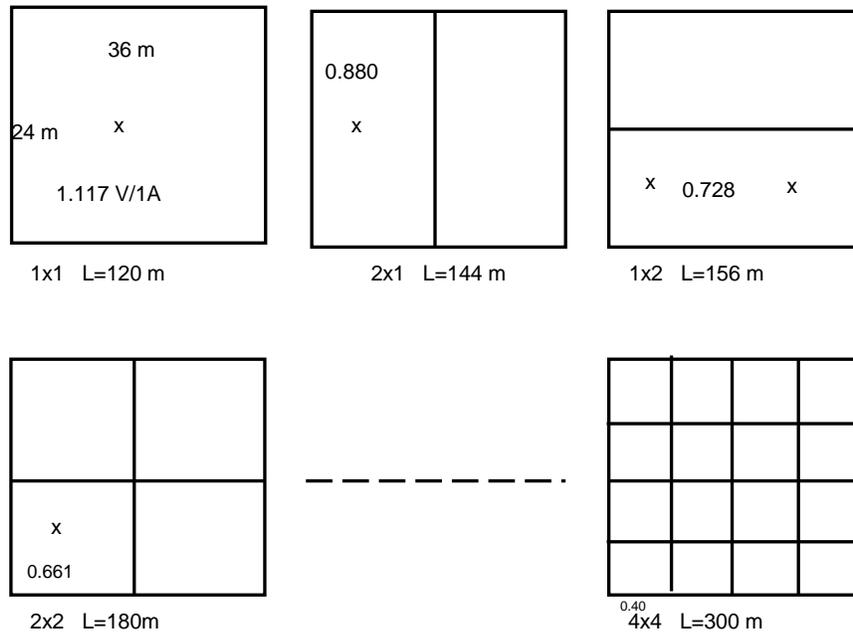
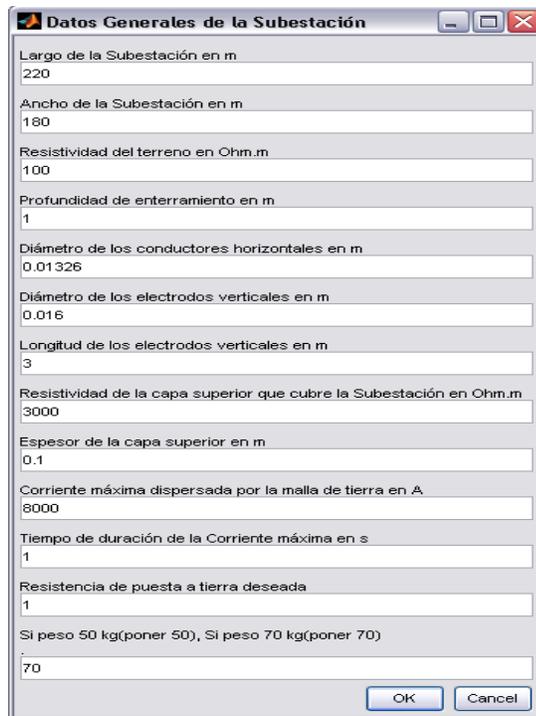


Figura 2.1 Tensión de contacto en V/1A para distintas configuraciones.

O sea, el proceso de optimización se inicia con la obtención de la malla de reticulado uniforme, la cual se logra con la menor cantidad de conductores que garantizan una resistencia por debajo de la deseada y potenciales de paso y de contacto inferiores a los tolerables, por ejemplo para los datos iniciales que se muestran en la figura 2.2, se obtiene la malla de reticulado uniforme mostrada en la figura 2.3, con un total de 3360 m de conductor.



Parámetro	Valor
Largo de la Subestación en m	220
Ancho de la Subestación en m	180
Resistividad del terreno en Ohm.m	100
Profundidad de enterramiento en m	1
Diámetro de los conductores horizontales en m	0.01326
Diámetro de los electrodos verticales en m	0.016
Longitud de los electrodos verticales en m	3
Resistividad de la capa superior que cubre la Subestación en Ohm.m	3000
Espesor de la capa superior en m	0.1
Corriente máxima dispersada por la malla de tierra en A	8000
Tiempo de duración de la Corriente máxima en s	1
Resistencia de puesta a tierra deseada	1
Si peso 50 kg(poner 50), Si peso 70 kg(poner 70)	70

Figura 2.2. Datos iniciales.

La figura 2.4 muestra los potenciales de contacto en la malla de reticulado uniforme. Como se observa los potenciales de contacto máximo en los módulos no es uniforme, siendo mayor en los módulos esquina y disminuyendo hacia el centro. Esta no uniformidad, es lo que permite redistribuir los conductores, de adentro hacia fuera y lograr eliminar conductores y en consecuencia reducir la longitud total de conductor, o sea optimizar la malla de reticulado uniforme en cuanto a longitud de conductor.

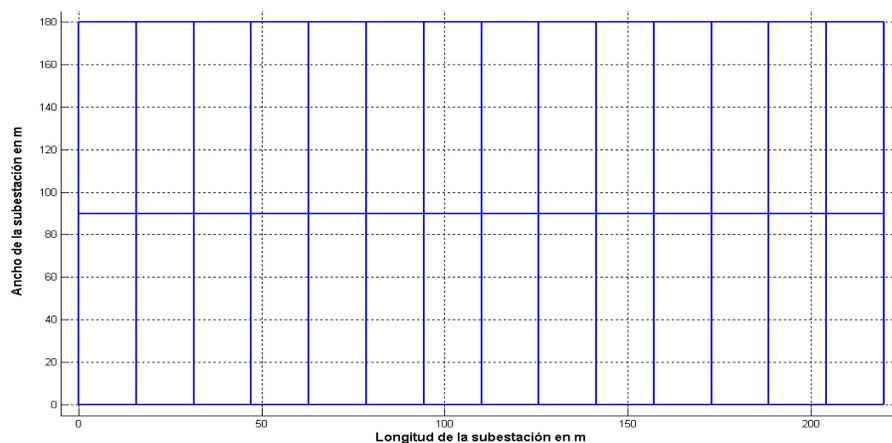


Figura 2.3. Malla de reticulado uniforme.

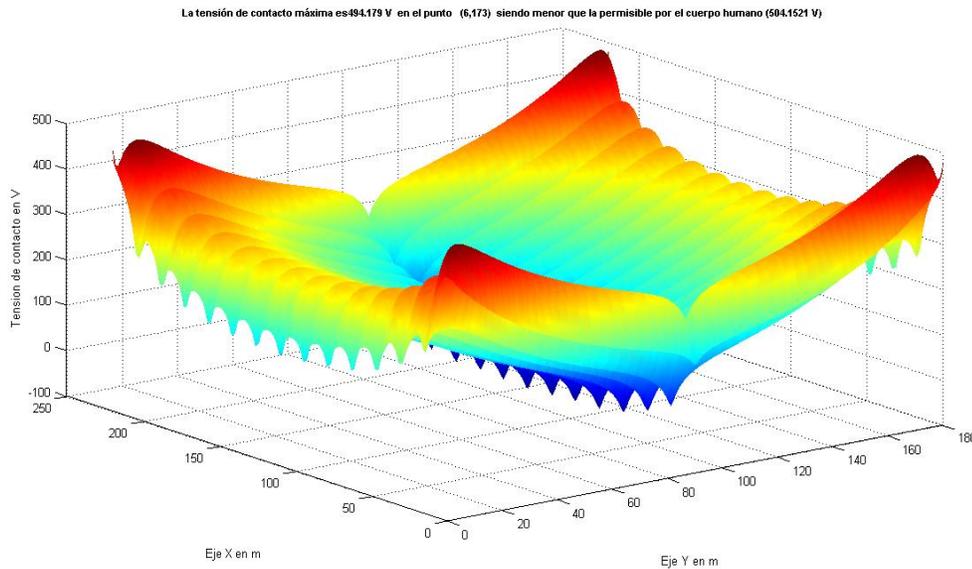


Figura 2.4. Tensiones de contacto en la malla de reticulado uniforme.

2.3 Optimización de mallas de puesta a tierra.

Anteriormente se indicó la forma más conveniente de diseñar una malla en forma rectangular que tiene sus conductores separados a igual distancia en cada dirección. El proceso consiste en ir aumentando en incrementos mínimos la cantidad total de conductor de la malla, de manera que cada nuevo incremento sea con la variante de menor cantidad de conductor total, hasta que se satisfaga el requerimiento de $U_{cont} \leq U_{tol}$. Esta forma inicial de diseño puede considerarse como una primera etapa o fase de un proceso global de optimización. Las mallas así diseñadas presentan tensiones de paso y de contacto que son mayores en los módulos esquinas y decrecen hacia el interior, lo que significa sobredimensionar una cantidad importante de éstas. Por tanto, la segunda fase del proceso de optimización consiste en disponer los conductores de la malla obtenida en la primera fase, de tal manera que las tensiones sean, en una situación ideal, iguales en todos los módulos.

El objetivo de esta segunda fase de optimización es reducir aún más la cantidad total de conductor y excavaciones de la malla para una misma solicitud máxima, o lo que es equivalente, minimizar la solicitud máxima para una determinada cantidad de conductor de la malla. En la figura 2.5 se esquematizan estas formas de optimizar. La configuración de a), es una solución obtenida de la primera fase de optimización que satisface la

condición de U_{tol} . En b) se consigue reducir la cantidad total de conductor de la malla en 9%, incluso reduciendo un poco la solicitación máxima. Si la solicitación máxima de a) (0.421 V/1A) no hubiera llegado a cumplir con el requerimiento de U_{tol} , es posible disminuir este valor en 13%, con una separación irregular de los mismos conductores, como se muestra en c). [5] [6]

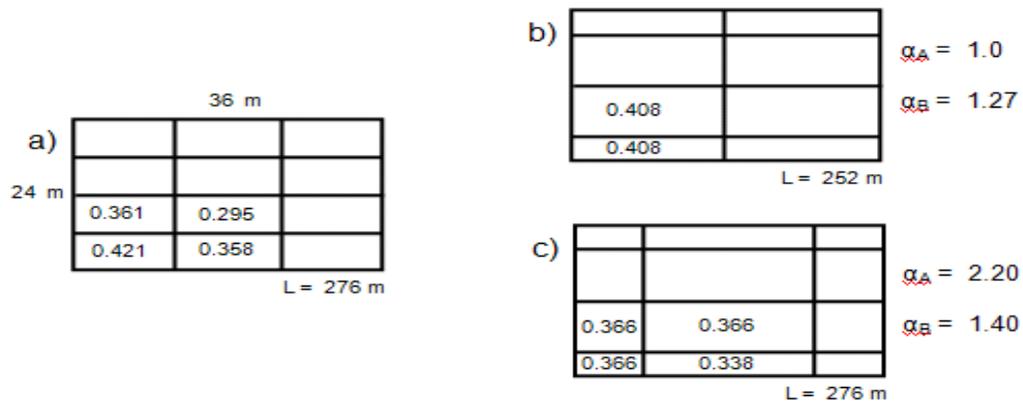


Figura 2.5. Forma de optimizar una malla mediante separación irregular de sus conductores.

El problema básico de solución óptima de una malla de tierra irregular es determinar la separación que debe existir entre los distintos conductores de una malla, en cada dirección, de manera que las tensiones máximas de contacto y de paso en su interior sean iguales. Sin embargo, salvo configuraciones de mallas muy simples, no es posible lograr la situación ideal en que todos los módulos posean la misma tensión máxima y, por tanto, debe aceptarse una solución que sea lo más cercana posible a esa condición. Un método simple, basado en procesos exactos de optimización de mallas de tierra regulares, se muestra a continuación. Para ello se ha elegido de forma arbitraria una función de potencia, del tipo mostrado en la figura 2.6, que representa la ubicación de los elementos de una malla. De este modo, se definen $F(i)$ y $F(j)$ como los valores en p.u de ubicación en una columna i o fila j de elementos; donde N_m es el número de módulos del lado en cuestión y α es un parámetro a determinar para cada lado, obtenido de una correlación de soluciones cuasi-exactas de optimización. En términos generales, la función elegida para representar la ubicación de los elementos podría ser otra, o incluso podría ser una función mixta o no continua.

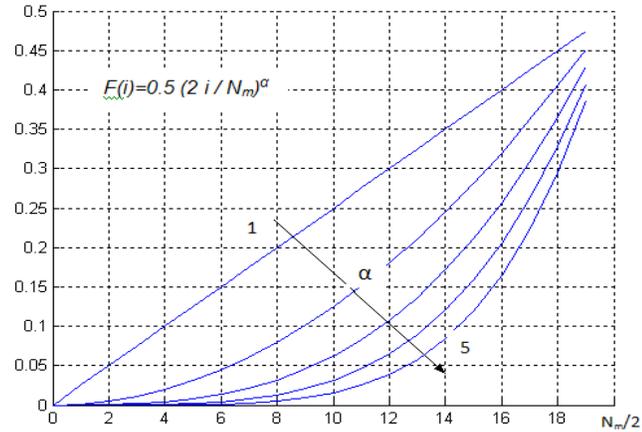


Figura 2.6. Función de ubicación de los elementos de una malla de tierra

Así, sobre la base de la función elegida, la ubicación en el eje X de cada columna de elementos de longitud B, de la malla irregular de la figura 2.7, es:

$$x(i) = 0.5 A (2 i / NmA) \alpha A$$

$$i = 0,1,2,3,\dots,\text{ENT}(NmA/2) \quad (2) \quad x(NmA-i) = A - x(i) \quad (3)$$

En forma similar, la ubicación en el eje Y de cada fila de elementos de longitud A, es:

$$y(j) = 0.5 A (2 j / NmB) \alpha B \quad (4)$$

$$j = 0,1,2,3,\dots,\text{ENT}(NmB/2) \quad (5) \quad y(NmB-j) = A - y(j) \quad (6)$$

Los valores de αA y αB se determinan de soluciones de correlaciones de soluciones cuasi-exactas de optimización, para mallas con distintas dimensiones, números de módulos y relaciones de lados. [5] [6]

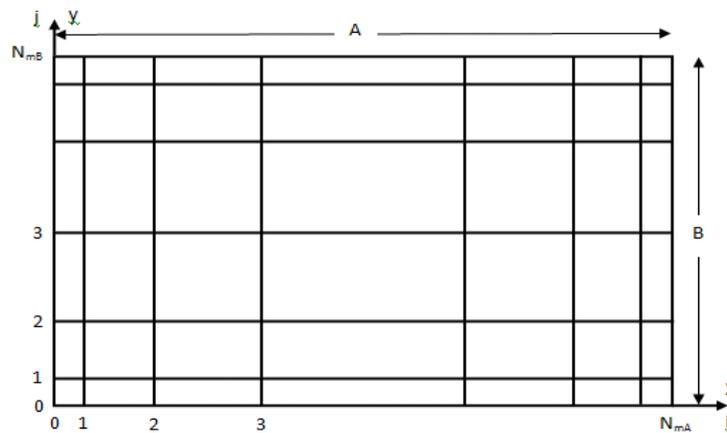


Figura 2.7. Malla de tierra con separación irregular de conductores.

2.4 Valores de α_A y α_B para una malla rectangular.

Los valores de α_A y α_B , indicados a continuación, se han obtenido de correlaciones de resultados de cuasi-optimización de mallas rectangulares para diferentes tamaños, número de módulos y relaciones de lados.

Para el lado mayor A:

$$\alpha_A = \alpha_0 (0.685 e^{0.378 K}) \quad (7)$$

Para el lado menor B:

$$\alpha_B = \alpha_0 (1 - 0.0789 \ln K) \quad (8)$$

Donde α_0 es el valor de α correspondiente a una malla cuadrada de área $A \times B$:

$$\alpha_0 = 1.154 + 0.170 \ln N_m + 0.0445 \ln K \quad (9)$$

$$\text{Donde: } K=A/B \quad (10) \quad N_m = (N_{mA} + N_{mB}) / 2 \quad (11)$$

Los coeficientes 1.154, 0.170 y 0.0445 de la expresión 9, obtenidos de las correlaciones de resultados de cuasi-optimización de mallas rectangulares, no dan una solución realmente óptima para mallas de diferentes tamaños. Una solución a este problema puede ser la búsqueda de coeficientes particulares para cada malla en específico a través de un proceso de minimización de las diferencias entre los máximos de los diferentes módulos que componen la malla, donde estos coeficientes son las variables de la función de optimización. Con este objetivo se usó la función `fminsearch` del MatLab cuyas sintaxis y descripción se muestran a continuación:

fminsearch

Buscar mínimos de la función multivariable sin restricciones, utilizando el método de derivadas libres.

Syntax

```
x = fminsearch(fun,x0)
x = fminsearch(fun,x0,options)
[x,fval] = fminsearch(...)
```

[x,fval,exitflag] = fminsearch(...)
 [x,fval,exitflag,output] = fminsearch(...)

Descripción

fminsearch encuentra el mínimo de una función escalar de varias variables, desde una estimación inicial. Esto se conoce generalmente como la optimización no lineal sin restricciones.

Si se toman como condiciones iniciales para las variables de optimización los valores de coeficientes antes mencionados el tiempo necesario para obtener la solución es relativamente grande (10 minutos), con el objetivo de tratar de reducir el tiempo de cómputo en la búsqueda de la solución óptima, se realizó el cálculo de diferentes configuraciones de subestaciones, observándose que los coeficientes que daban solución óptima eran relativamente diferentes, tal como se muestra en la tabla 2.1. Por tal motivo se decidió continuar usando como condiciones iniciales los de la expresión 9.

Tabla 2.1. Coeficientes de α_0

Malla(corriente)	C1	C2	C3
110x100(4450)	2.2546	0.1007	0.0198
110x100(4498)	2.2546	0.1007	0.0198
120x100(4550)	2.2254	0.1007	0.0195
120x100(4700)	2.2439	0.0812	0.0193
120x100(4800)	2.2439	0.0812	0.0193
120x100(5000)	2.2439	0.0812	0.0193
130x100(4900)	2.2439	0.0812	0.0193
130x100(4781)	2.2439	0.0812	0.0193
140x100(5000)	1.9437	0.1089	0.0262
140x100(5474)	1.7054	0.1379	0.0304
150x100(5200)	1.7054	0.1379	0.0304
150x100(5495)	1.7054	0.1379	0.0304
160x100(5400)	1.7118	0.1360	0.0334
160x100(5635)	1.7118	0.1360	0.0334
170x100(5600)	1.5579	0.1436	0.0363
170x100(5667)	1.5194	0.1360	0.0356
180x100(5800)	1.3463	0.1643	0.0401
180x100(5990)	1.2822	0.1662	0.0415

190x100(5750)	1.3463	0.1643	0.0401
190x100(5625)	2.6221	0.0831	0.0119
190x100(5800)	1.2502	1.1587	0.0423
190x100(5850)	1.2822	0.1662	0.0415
190x100(5900)	1.2822	0.1662	0.0415
200x100(5900)	1.2117	0.1700	0.0445
200x100(6020)	1.2117	0.1700	0.0445
210x100(6000)	1.2117	0.1700	0.0445
210x100(6100)	1.2117	0.1700	0.0445
210x100(6200)	1.2117	0.1700	0.0445
210x100(5977)	2.6221	0.0831	0.0119

La obtención de la malla optimizada parte de determinar la distribución de conductores, tanto por el eje Y como por el eje X, que garantiza valores similares de tensión de contacto máxima en cada uno de los módulos de la malla, para las condiciones iniciales de profundidad de enterramiento y sección del conductor. La figura 2.8 muestra la malla así obtenida del ejemplo anterior.

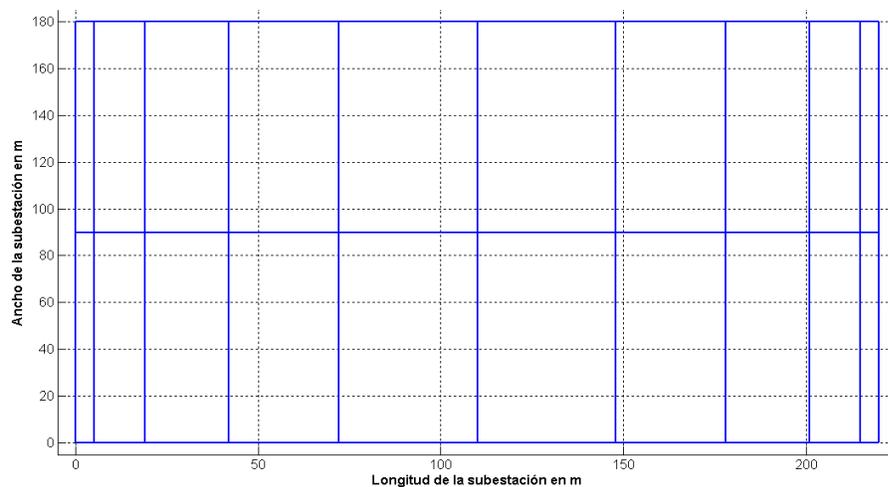


Figura 2.8. Malla optimizado en longitud del conductor.

Como se observa se logran eliminar 4 conductores de 180 m de longitud para un total de 720 m, lo que representa una reducción del 21.4 % con respecto a la malla de reticulado uniforme. La figura 2.9 muestra los potenciales de contacto en la malla optimizada en longitud.

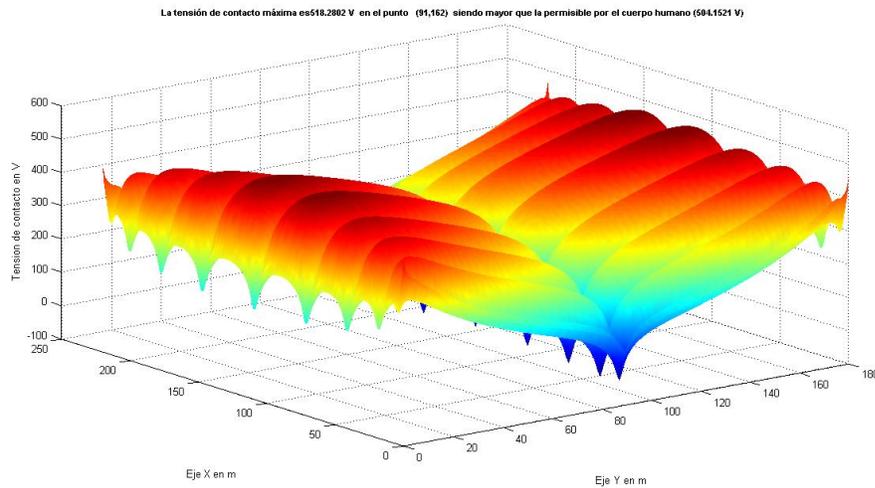


Figura 2.9. Tensiones de contacto en la malla optimizada.

En esta figura se puede apreciar la uniformidad en los potenciales de contacto máximo en cada uno de los módulos.

2.5 Optimización de sección del conductor y profundidad de enterramiento.

Una vez que se obtiene esta malla optimizada en longitud del conductor se procede a la optimización de la malla en profundidad de enterramiento de los conductores (o sea en cuanto a movimiento de tierra) y sección de los conductores, esto se hace a través de la minimización de una función de costo que garantiza además tensiones de contacto y de paso por debajo de las tolerables y resistencia de conexión a tierra por debajo de la deseada. La figura 2.10 muestra los resultados de la malla así optimizada, donde se observa que la propuesta óptima propone una disminución en la profundidad de enterramiento de 1m hasta 0,73 m y un incremento del diámetro del conductor de 0.01326 m hasta 0.0201 m.

Parámetro	Valor
Resistencia de Puesta a tierra en Ohm	0.25103
Número de Conductores Horizontales en el eje X	3
Número de Conductores Horizontales en el eje y	11
Diámetro de los conductores en m	0.020107
Número de Barras Verticales	0
Diámetro de las Barras en m	0.016
Profundidad de enterramiento en m	0.73387
Longitud total de cables en m	2640

Figura 2.10. Resultados de la optimización total.

La función de costo a minimizar (12) tiene en cuenta el incremento o decremento en costo por efecto del diámetro del conductor y el efecto de la profundidad de enterramiento.

$$Costo_{Total} = Costo_{conductor} \cdot Long_{conductor} + Costo_{mov} \cdot Prof \cdot Long_{conductor} \cdot 0.5 \quad (12)$$

Donde:

$Costo_{Total}$ = Costo total a minimizar.

$Costo_{conductor}$ = Costo del conductor en función de su diámetro.

$Long_{conductor}$ = Longitud total de conductor.

$Costo_{mov}$ = Costo por el desplazamiento de un metro cúbico de tierra.

$Prof$ = Profundidad de enterramiento.

0.5 es el ancho de la excavación a realizar.

Con este objetivo se usó la función `fmincon` del Matlab cuyas sintaxis y descripción se muestran a continuación:

fmincon

Buscar mínimos de la función no lineal multivariable con restricciones.

Ecuación

Encuentra el mínimo de un problema especificado por

$$\min_x f(x) \text{ such that } \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ ceq(x) = 0 \\ A \cdot x \leq b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub, \end{cases}$$

x , b , beq , lb , ub son vectores, A y Aeq son matrices, $c(x)$ y $ceq(x)$ son funciones que los vectores de cambio, y $f(x)$ es una función que devuelve un escalar. $f(x)$, $c(x)$, y $ceq(x)$ pueden ser funciones no lineales.

Syntax

- x = `fmincon(fun,x0,A,b)`
- x = `fmincon(fun,x0,A,b,Aeq,beq)`
- x = `fmincon(fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub)`
- x = `fmincon(fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon)`
- x = `fmincon(fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,options)`
- x = `fmincon(problem)`
- $[x,fval]$ = `fmincon(...)`
- $[x,fval,exitflag]$ = `fmincon(...)`
- $[x,fval,exitflag,output]$ = `fmincon(...)`
- $[x,fval,exitflag,output,lambda]$ = `fmincon(...)`
- $[x,fval,exitflag,output,lambda,grad]$ = `fmincon(...)`
- $[x,fval,exitflag,output,lambda,grad,hessian]$ = `fmincon(...)`

Descripción

fmincon intenta encontrar un mínimo de una función escalar de varias variables con restricciones a partir de una estimación inicial. Esto se conoce generalmente como la optimización no lineal con restricciones o programación no lineal.

En este caso se dan como restricciones el valor mínimo y máximo de sección del conductor y la profundidad mínima y máxima de enterramiento.

CAPÍTULO 3.

COMPARACIÓN Y ANÁLISIS ENTRE EL PROGRAMA PAST Y LA METODOLOGÍA PROPUESTA POR LA IEEE EN SU Std.80/2000.

3.1 Introducción

En este Capítulo se realiza una comparación entre el programa PAST y la metodología propuesta por la norma Std. 80/2000 de la IEEE realizando un análisis de los costos de las diferentes configuraciones de mallas de tierra para los dos pesos normalizados de persona 50 y 70 kg., teniendo en cuenta los costos de los elementos utilizados para estos proyectos.

3.2 Costos de diseño de una malla de tierra.

Para realizar el análisis económico del proyecto de una malla de puesta a tierra es necesario tener en cuenta los costos de conductores, uniones y movimiento de tierra, para esto fue necesario investigar en las empresas más capacitadas para estos trabajos como son: Copextel y el Micons. A continuación se puede observar una lista de los diferentes tipos de materiales que pueden ser utilizados en un diseño como este y sus costos en moneda libremente convertible y moneda nacional.

Tabla 3.1 Costos

Elementos	Costo en (CUC)	Costo en(CUP)
<i>Cable 1/0 desnudo THW</i>	8.38	3.77
<i>Cable 2/0 desnudo THW</i>	11.55	5.20
<i>Cable 3/0 desnudo THW</i>	14.47	6.51
<i>Cable 4/0 desnudo THW</i>	19.33	8.70
<i>Soldadura exotérmica E90</i>	5.12	2.30
<i>Molde para soldadura tipo T y L</i>	93.98	41.98
<i>Unión para derivación T60</i>	2.41	1.19
<i>Unión para derivación T100</i>	4.49	2.10
<i>Unión de 45 interna y externa 100</i>	4.49	2.10
<i>Excavación con bulldózer</i>	0.74 / m ³	0.30 / m ³
<i>Excavación con retocadora</i>	0.88 / m ³	0.35 / m ³
<i>Excavación con moto traílla</i>	2.14 / m ³	1.02 / m ³

3.3 Diseño de mallas de tierra por ambos métodos.

Para realizar la comparación se parten de los datos mostrados en la figura 2.2 del Capítulo II, tanto para el diseño con el programa PAST como por la metodología de la IEEE.

Con el PAST

En las Figuras 3.1., 3.2., 3.3. y 3.4. se muestran las mallas obtenidas por el PAST y en las figuras 3.5. y 3.6. por la metodología propuesta por la IEEE en su Std. 80/2000, para mallas de reticulado uniforme y optimizadas y además para los dos pesos típicos de personas (50 y 70 Kg.) [3]

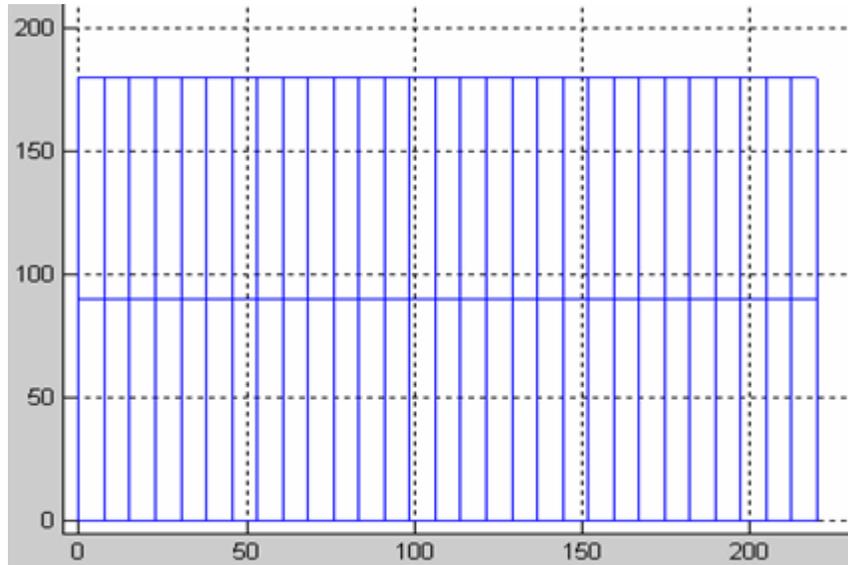


Figura 3.1. Malla de reticulado uniforme (30x3) conductores para personas de 50 Kg. de peso.

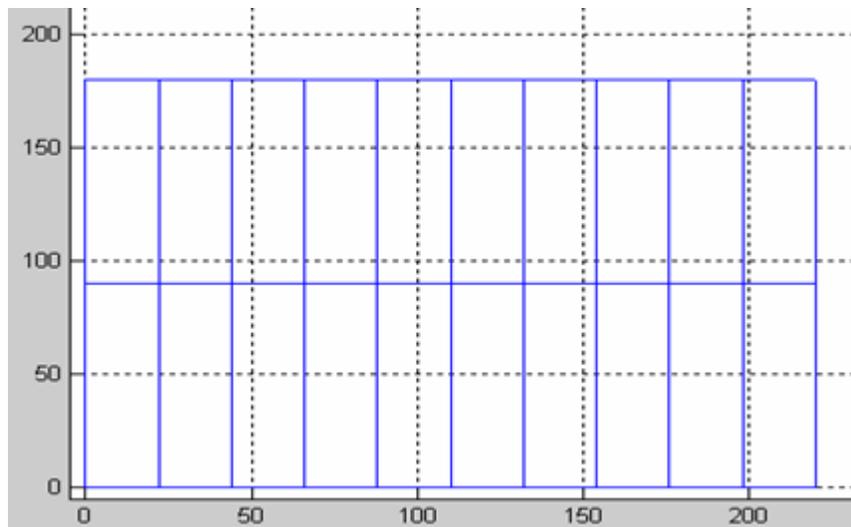
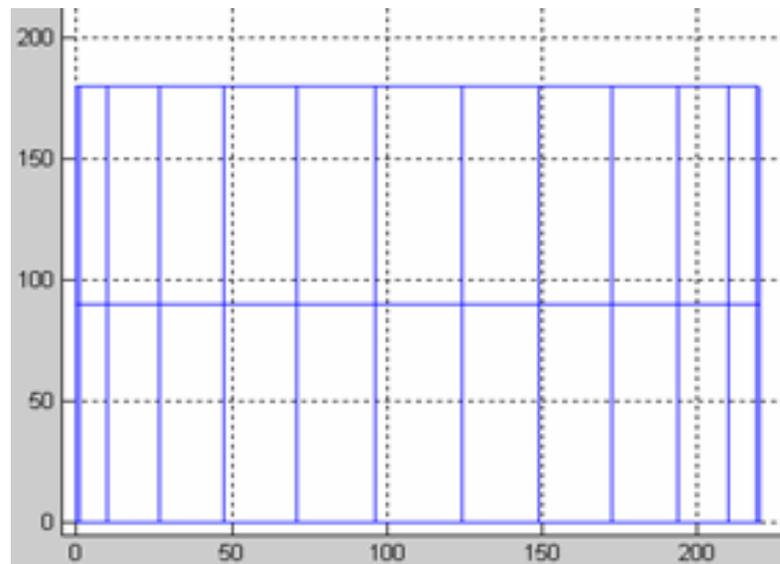
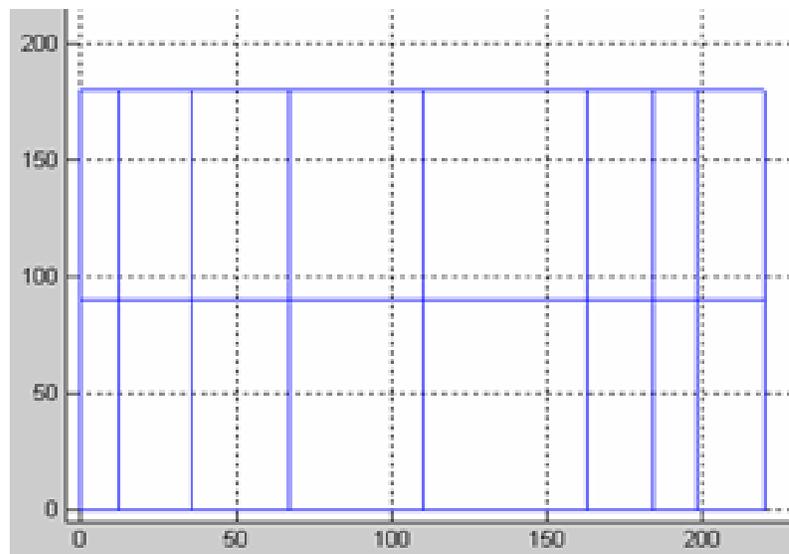


Figura 3.2. Malla de reticulado uniforme (11x3) conductores para personas de 70 Kg. de peso.



**Figura 3.3. Malla optimizada de (14x3) conductores
para personas de 50 Kg. de peso.**



**Figura 3.4. Malla optimizada de (9x3) conductores
Para personas de 70 Kg. de peso.**

Con la metodología de la IEEE

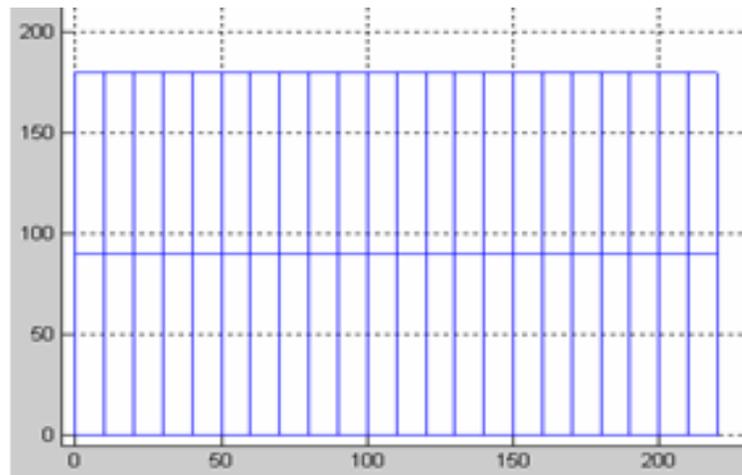


Figura 3.5. Malla de reticulado uniforme (23x3) conductores para personas de 50 Kg. de peso.

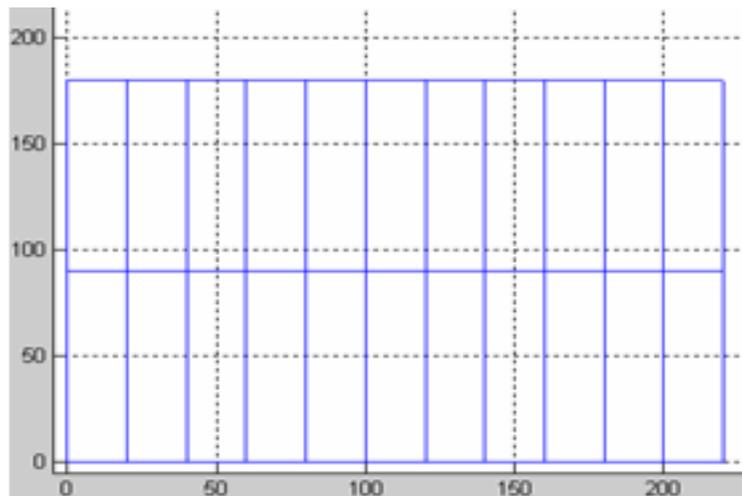


Figura 3.6. Malla de reticulado uniforme de la IEEE con (12x3) Conductores para personas de 70 Kg. de peso.

Como se puede observar tanto para un peso como para el otro, la malla obtenida por el PAST de reticulado uniforme tiene un mayor número de conductores que la obtenida por la metodología de la IEEE, esto se debe a que los voltajes tolerables que utiliza la IEEE son

mayores que los que se utilizan el PAST. Esto indica una mayor seguridad con el PAST que con la metodología de la IEEE. Por otra parte el PAST al hacer el proceso de optimización desarrollado en este trabajo logra una malla de reticulado distribuido con una marcada diferencia en la disminución en la cantidad de conductores con respecto a la obtenida con la metodología de la IEEE, lo cual se logra con una distribución más uniforme de los potenciales de contacto en toda el área de la malla. [3] [8] [12]

3.3.1 Costo de los elementos para cada configuración de malla.

En las Tablas 3.2, 3.3., 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7 se muestran los costos en cada configuración de malla según el peso de la persona (50 y 70 Kg.), Como era de esperar la malla obtenida por la metodología de la IEEE es más económica que la de reticulado uniforme obtenida por el PAST para 1/0 y 50 Kg.(54484 cuc), para 4/0 y 50 Kg. (118876 cuc), pero mucho más cara que la óptima obtenida por el PAST para 1/0 y 560 Kg. (28405 cuc), para 4/0 y 50 Kg.(62356 cuc), para 50 Kg. de la IEEE para 1/0 (42976 cuc) y para 4/0 (94001 cuc)

Tabla 3.2. Costo de los elementos para una malla de reticulado uniforme de (30x3) conductores para personas con 50 Kg. de peso. Obtenida con el PAST.

Elementos	Cantidad		Costo/U		Costo Total	
	1/0	4/0	1/0	4/0	1/0	4/0
Conductores	6060	6060	8.38	19.33	50782.8	117139.8
Uniones	Soldadura exotérmica E90	Unión para derivación T	Soldadura exotérmica E90	Unión para derivación	Soldadura exotérmica E90	Unión para derivación T
	90	90	5.12	4.49	460.8	404.1
Excavaciones			Con Moto	Con Reto	Con Moto	Con Reto
			2.14	0.88	3242	1333
Total					54484	118876

**Tabla 3.3. Costo de los elementos para una malla optimizada de (14x3)
 conductores para personas de 50 Kg. de peso.**

Elementos	Cantidad		Costo/U		Costo Total	
	1/0	4/0	1/0	4/0	1/0	4/0
Conductores						
	<i>3180</i>	<i>3180</i>	<i>8.38</i>	<i>19.33</i>	<i>26489.4</i>	<i>61469.4</i>
Uniones	Soldadura exotérmica E90	Unión para derivación T	Soldadura exotérmica E90	Unión para derivación T	Soldadura exotérmica E90	Unión para derivación T
	<i>42</i>	<i>42</i>	<i>5.12</i>	<i>4.49</i>	<i>215.04</i>	<i>188.58</i>
Excavaciones			Con Moto	Con Reto	Con Moto	Con Reto
			<i>2.14</i>	<i>0.88</i>	<i>1701</i>	<i>699</i>
Total					<i>28405</i>	<i>62356</i>

**Tabla 3.4. Costo de los elementos para una malla de reticulado uniforme de la IEEE
 con (23x3) conductores para personas 50 Kg. de peso.**

Elementos	Cantidad		Costo/U		Costo Total	
	1/0	4/0	1/0	4/0	1/0	4/0
Conductores						
	<i>4800</i>	<i>4800</i>	<i>8.38</i>	<i>19.33</i>	<i>40224</i>	<i>92784</i>
Uniones	Soldadura exotérmica E90	Unión para derivación T	Soldadura exotérmica E90	Unión para derivación T	Soldadura exotérmica E90	Unión para derivación T
	<i>69</i>	<i>69</i>	<i>5.12</i>	<i>4.49</i>	<i>184.32</i>	<i>161.64</i>

Excavaciones			<i>Con Moto</i>	<i>Con Reto</i>	<i>Con Moto</i>	<i>Con Reto</i>
			2.14	0.88	2568	1056
Total					42976	94001

Tabla 3.5. Costo de los elementos para una malla de reticulado uniforme de (11x3) conductores para personas con 70 Kg. de peso.

Elementos	Cantidad		Costo/U		Costo Total	
Conductores	1/0	4/0	1/0	4/0	1/0	4/0
	2640	2640	8.38	19.33	22123.5	51031.3
Uniones	Soldadura exotérmica E90	Unión para derivación T	Soldadura exotérmica E90	Unión para derivación T	Soldadura exotérmica E90	Unión para derivación T
	33	33	5.12	4.49	168.96	148.17
Excavaciones			<i>Con Moto</i>	<i>Con Reto</i>	<i>Con Moto</i>	<i>Con Reto</i>
			2.14	0.88	1412	580
Total					23703	51759

Tabla 3.6. Costo de los elementos para una malla optimizada de (9x3) conductores para personas con 70 Kg. de peso.

Elementos	Cantidad		Costo/U		Costo Total	
	1/0	4/0	1/0	4/0	1/0	4/0
Conductores	1/0	4/0	1/0	4/0	1/0	4/0
	2280	2280	8.38	19.33	19106.4	44072.4
Uniones	Soldadura exotérmica E90	Unión para derivación T	Soldadura exotérmica E90	Unión para derivación T	Soldadura exotérmica E90	Unión para derivación T
	27	27	5.12	4.49	138.24	121.23
Excavaciones			Con Moto	Con Reto	Con Moto	Con Reto
			2.14	0.88	1219	501
Total					20463	44694

Tabla 3.7. Costo de los elementos para una malla de reticulado uniforme de la IEEE con (12x3) conductores para personas con 70 Kg. de peso.

Elementos	Cantidad		Costo/U		Costo Total	
	1/0	4/0	1/0	4/0	1/0	4/0
Conductores	1/0	4/0	1/0	4/0	1/0	4/0
	2820	2820	8.38	19.33	23490.6	54510.6
Uniones	Soldadura exotérmica E90	Unión para derivación T	Soldadura exotérmica E90	Unión para derivación T	Soldadura exotérmica E90	Unión para derivación T
	36	36	5.12	4.49	184.32	161.64

Excavaciones			Con Moto	Con Reto	Con Moto	Con Reto
			2.14	0.88	1508	620
Total					25182	55291

3.4 Propuesta de 5 ejemplos de mallas de tierra para su comparación con el método de la IIEE.

3.4.1 Malla de 110x 100 m²

Para la malla 110x100 m² con los datos que se muestran en la figura 3.7, se obtiene con el PAST un reticulado como el mostrado en la figura 3.8 y cuyos resultados finales se muestran en la figura 3.10.

Figura3.7. Datos generales de la malla de 110x100 m²

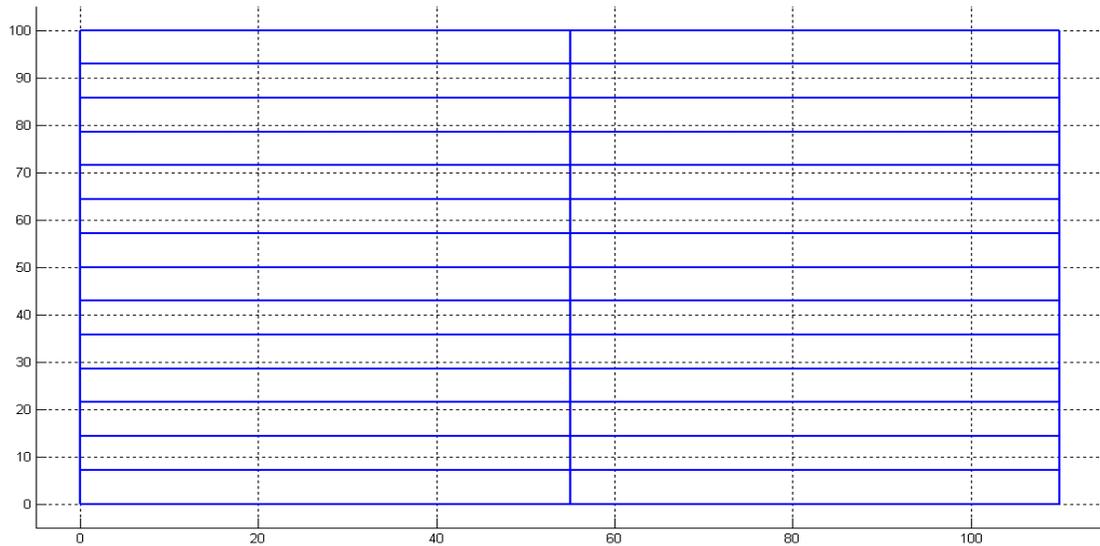


Figura 3.8. Reticulado uniforme de la malla de 110x100 m²

La figura 3.9 muestra los potenciales de contacto para esta malla de reticulado uniforme, en la que se puede apreciar la no uniformidad en los potenciales máximos de los módulos, presentándose los valores máximos en los módulos esquina.

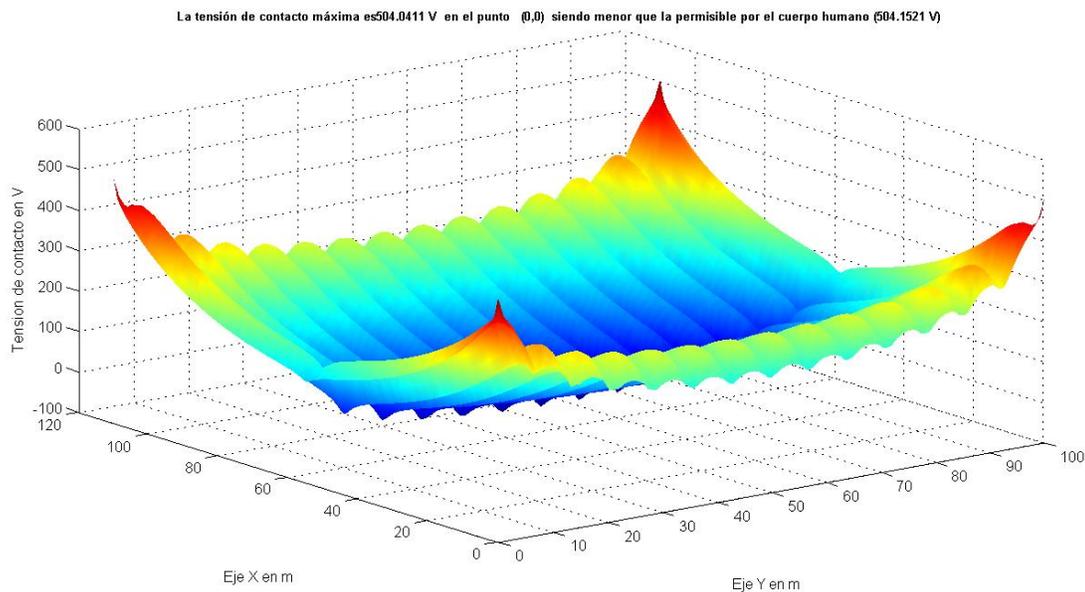


Figura 3.9. Potenciales de contacto de la malla de reticulado uniforme de 110x100 m².

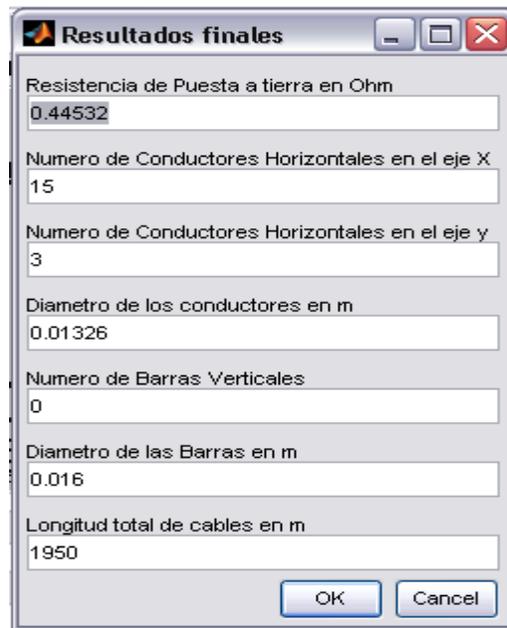


Figura 3.10. Resultados finales de la malla de reticulado uniforme de 110x100 m²

Cuando esta malla de reticulado uniforme se somete a un proceso de optimización con el PAST se obtiene la malla cuyo reticulado se muestra en la figura 3.11.

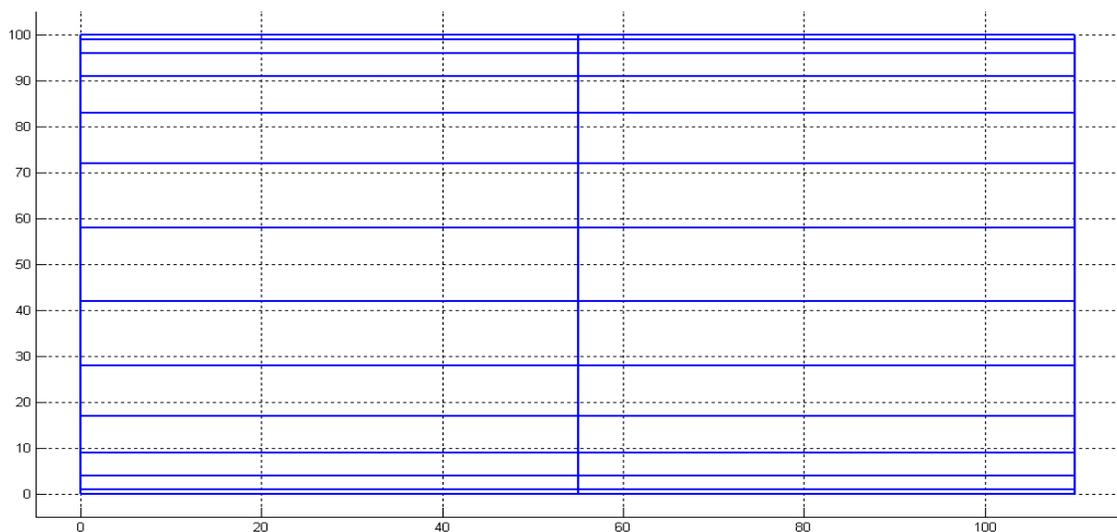


Figura 3.11. Malla de 110x100 m² optimizada

Los potenciales de contacto de esta malla optimizada se muestran en la figura 3.12, en la que se observa una distribución más uniforme de los potenciales máximos en todos los módulos.

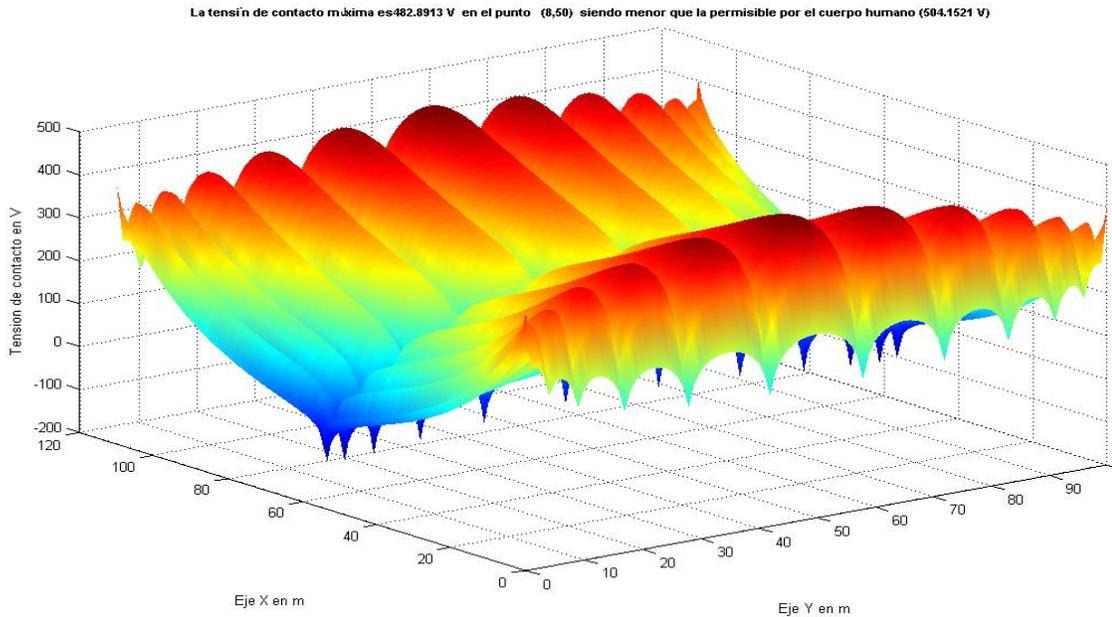


Figura 3.12. Potenciales de contacto de la malla de 110x100 m² optimizada

La figura 3.13 muestra los resultados finales de esta malla optimizada

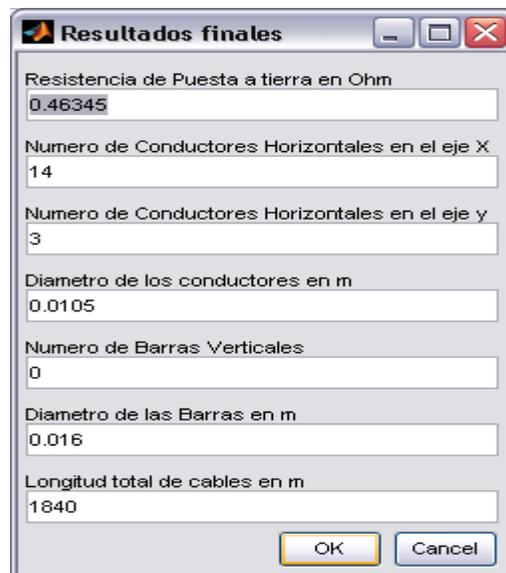


Figura 3.13. Resultados finales de la malla optimizada.

Aplicando el método propuesto por la norma Std 80 del 2000 de la IEEE, utilizando los datos anteriores se obtiene los resultados que se muestran en la figura 3.14.

CALCULO DE LA RETICULA DE MALLA DE PUESTA A TIERRA		
Lado Mayor de la Malla	m	110,0
Lado Menor de la Malla	m	100,0
Espacio Entre Conductores Paralelos D	m	15,00
N° de Conductores Paralelos al Lado Mayor	-	8
N° de Conductores Paralelos al Lado Menor	-	8
Longitud Total del Conductor de la Malla L_c	m	1683,3

CALCULO DE LA TENSION DE TOQUE		
Tensión de Toque E_m	V	504,67
Resistividad del Suelo ρ	$\Omega.m$	100
Factor de Espaciamiento Para Tensión de Toque K_m	-	1,031
Factor Correctivo por Geometría de la Malla K_i	-	1,831
Máxima Corriente de la Malla I_G	A	4.500
Longitud Total del Conductor de la Malla L_c	m	1.683,3

RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA		
Resistencia de Puesta a Tierra R_g	Ω	0,477

Figura 3.14. Resultados obtenidos con el método de la IEEE.

Con los resultados obtenidos con el método de la IEEE a través del PAST se diseña su configuración de electrodo para realizar un análisis de su potencial de contacto, como se muestra en la figura 3.15.

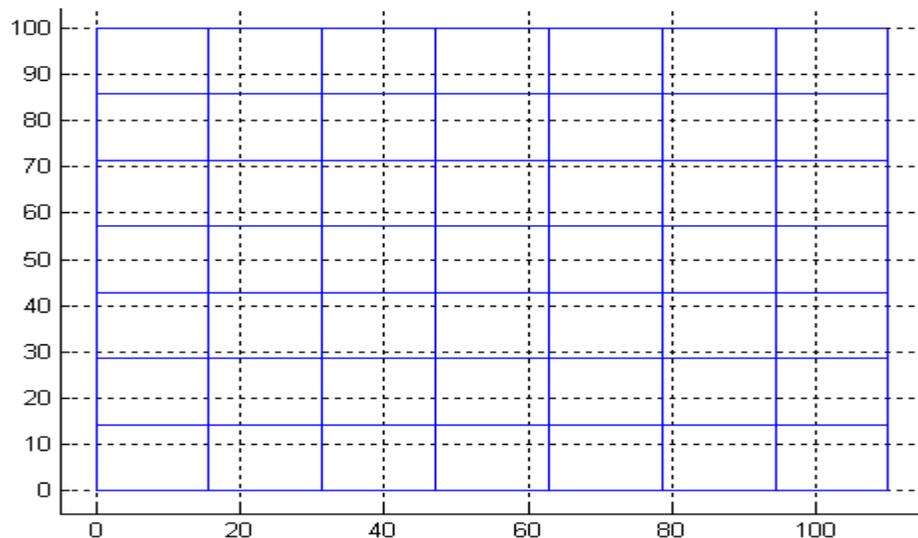


Figura 3.15. Configuración de electrodos del método de la IEEE malla 110x100 m²

Atendiendo a esta configuración de electrodos a continuación se muestra el potencial de contacto (Figura 3.16).

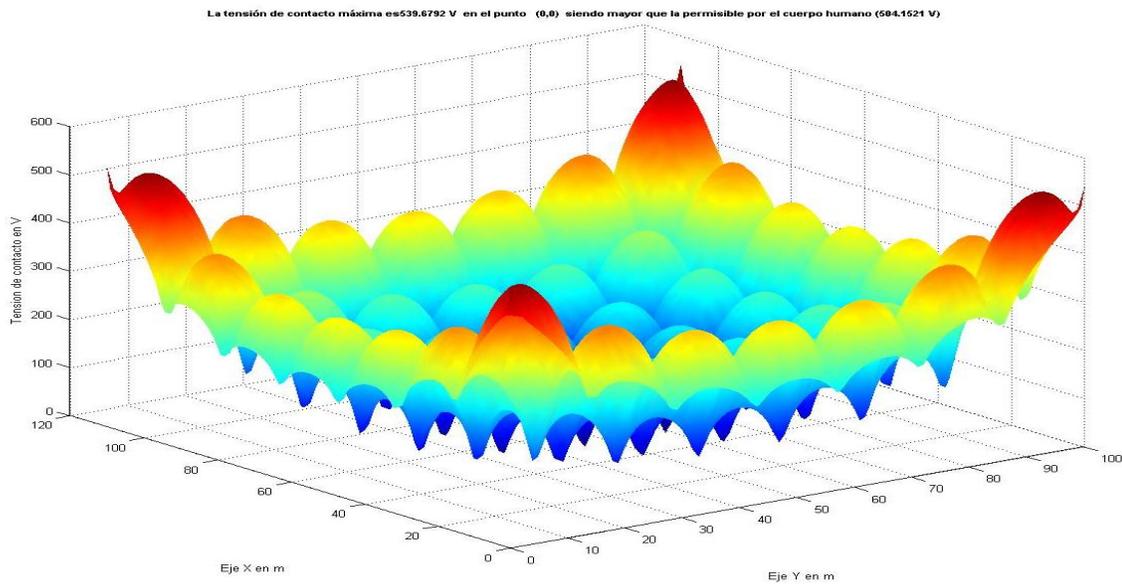


Figura 3.16. Potenciales de contacto del método de la IEEE (malla de 110x100 m²)

En la tabla 3.8 se hace una comparación de los resultados obtenidos con ambos métodos.

Tabla 3.8. Comparación de ambos métodos.

	IEEE	PAST Uniforme	PAST Optimizada
Longitud de conductor en m	1683	1950	1840
Potencial de contacto en v	539.6792	504.0411	482.8913

Como se aprecia en la tabla 3.8, en este caso particular la propuesta de la IEEE aparentemente ofrece mejores resultados, al quedar con menor cantidad de conductores.

3.4.2 Malla de 140x100 m²

Para la malla de 140x100 m² manteniendo los mismos datos mencionados anteriormente, pero con una corriente de 5474 A, se obtiene la malla cuyo reticulado se muestran en la figura 3.17.

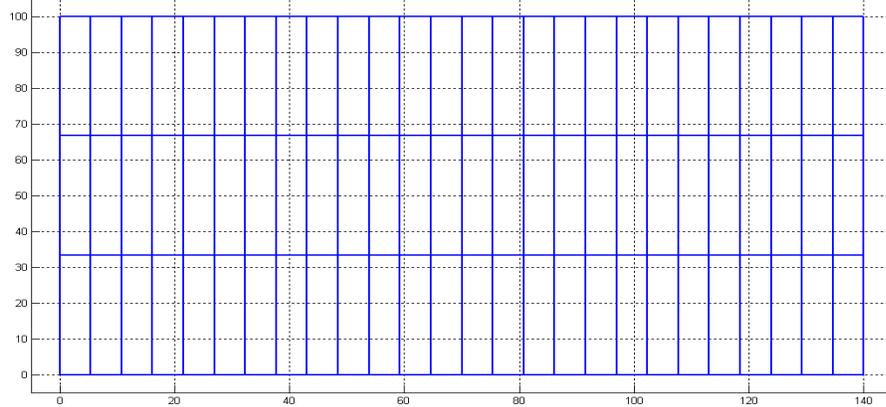


Figura 3.17. Malla de reticulado uniforme.

La figura 3.18 muestra los potenciales de contacto para esta malla de reticulado uniforme, en la que se puede apreciar la no uniformidad en los potenciales máximos de los módulos, presentándose los valores máximos en los módulos esquina.

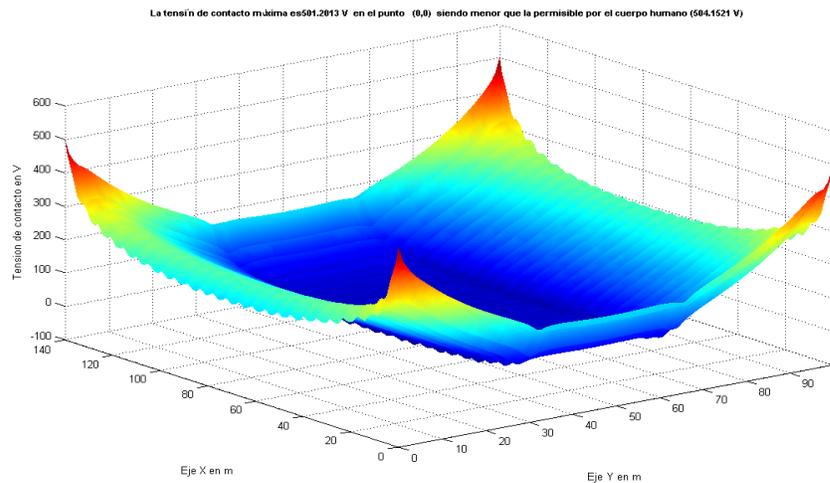


Figura 3.18. Potenciales de contacto de la malla de reticulado uniforme de 140x100 m².

La figura 3.19 muestra los resultados finales para esta malla.

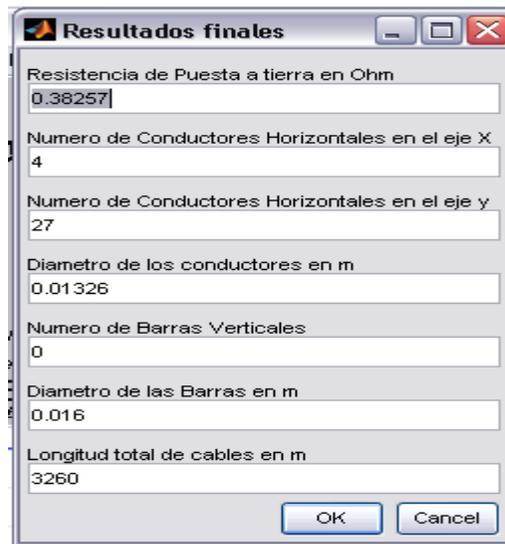


Figura 3.19. Resultados finales.

Cuando la malla de reticulado uniforme se somete a un proceso de optimización se obtiene el reticulado que muestra en la figura 3.20 y cuyos resultados finales aparecen en la figura 3.21.

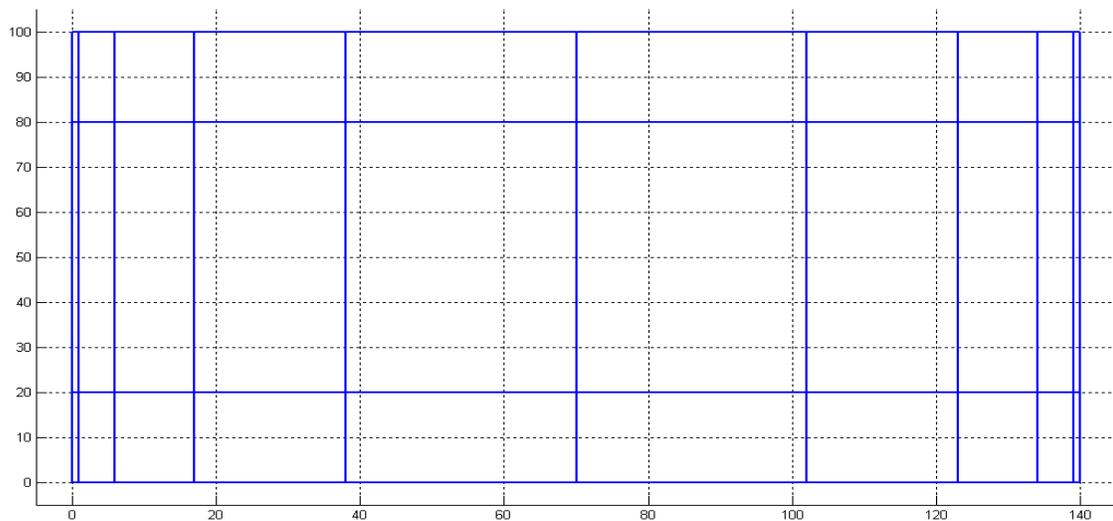


Figura 3.20. Reticulado de la malla optimizada.

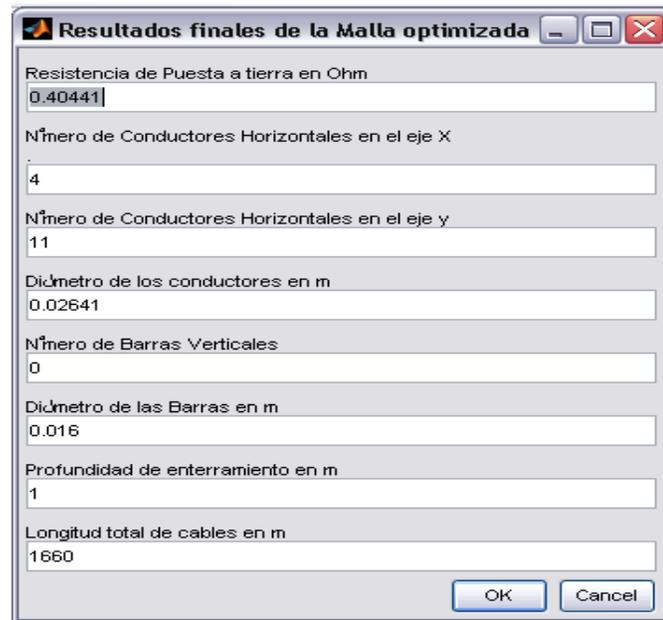


Figura 3.21. Resultados finales de la malla optimizada

En la 3.22 se aprecian los potenciales de contacto de la malla optimizada.

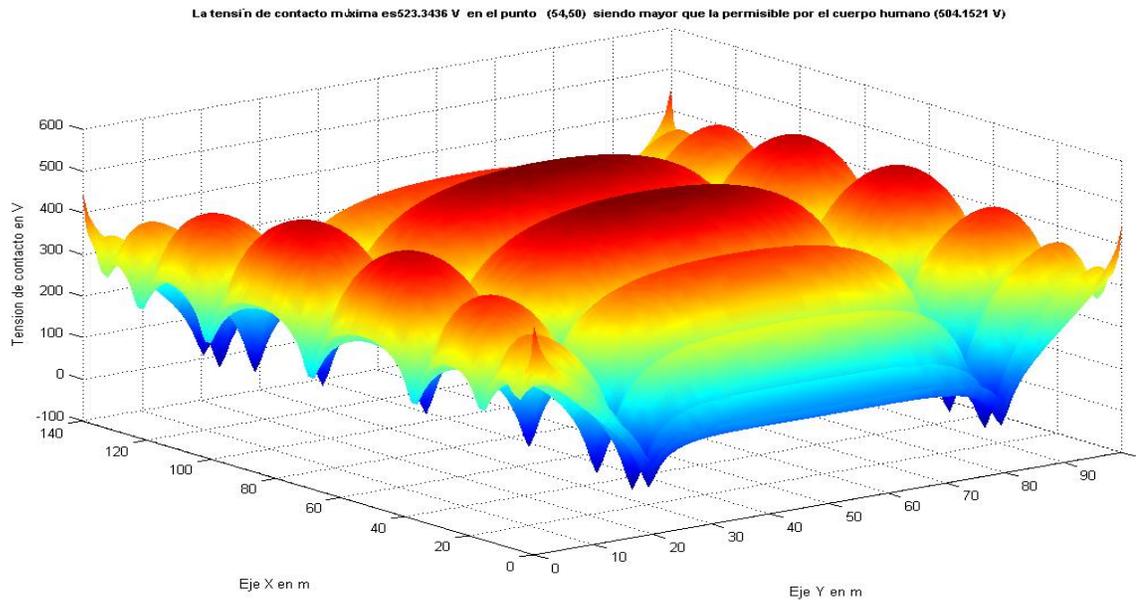


Figura 3.22. Potenciales de contacto de la malla optimizada.

Aplicando el método de la IEEE se obtienen los resultados que se muestran en la figura 3.23.

CALCULO DE LA RETICULA DE MALLA DE PUESTA A TIERRA		
Lado Mayor de la Malla	m	140,0
Lado Menor de la Malla	m	100,0
Espacio Entre Conductores Paralelos D	m	15,00
N° de Conductores Paralelos al Lado Mayor	-	10
N° de Conductores Paralelos al Lado Menor	-	8
Longitud Total del Conductor de la Malla L_c	m	2213,3

CALCULO DE LA TENSION DE TOQUE		
Tensión de Toque E_m	V	496,21
Resistividad del Suelo ρ	$\Omega.m$	100
Factor de Espaciamiento Para Tensión de Toque K_m	-	0,994
Factor Correctivo por Geometría de la Malla K_i	-	2,019
Máxima Corriente de la Malla I_G	A	5.474
Longitud Total del Conductor de la Malla L_c	m	2.213,3

RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA		
Resistencia de Puesta a Tierra R_g	Ω	0,416

Figura 3.23. Resultados del método de la IEEE

De forma análoga a la malla anterior a través del PAST se diseña la configuración de electrodo de la malla propuesta por el método de la IEEE para realizar un análisis de su potencial de contacto (Figura 3.24).

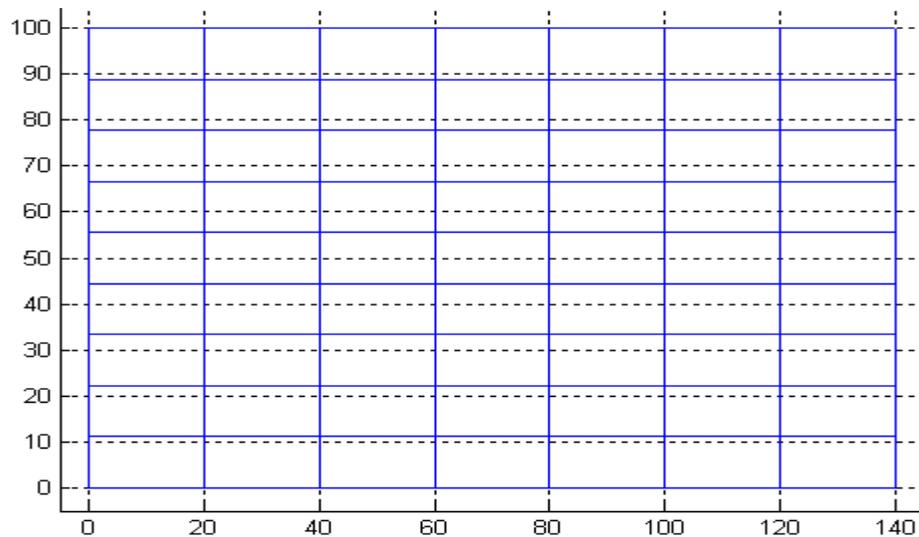


Figura 3.24. Configuración de electrodos método de la IEEE malla 140x100 m²

Atendiendo a esta configuración de electrodos a continuación se muestra el potencial de contacto (Figura 3.25).

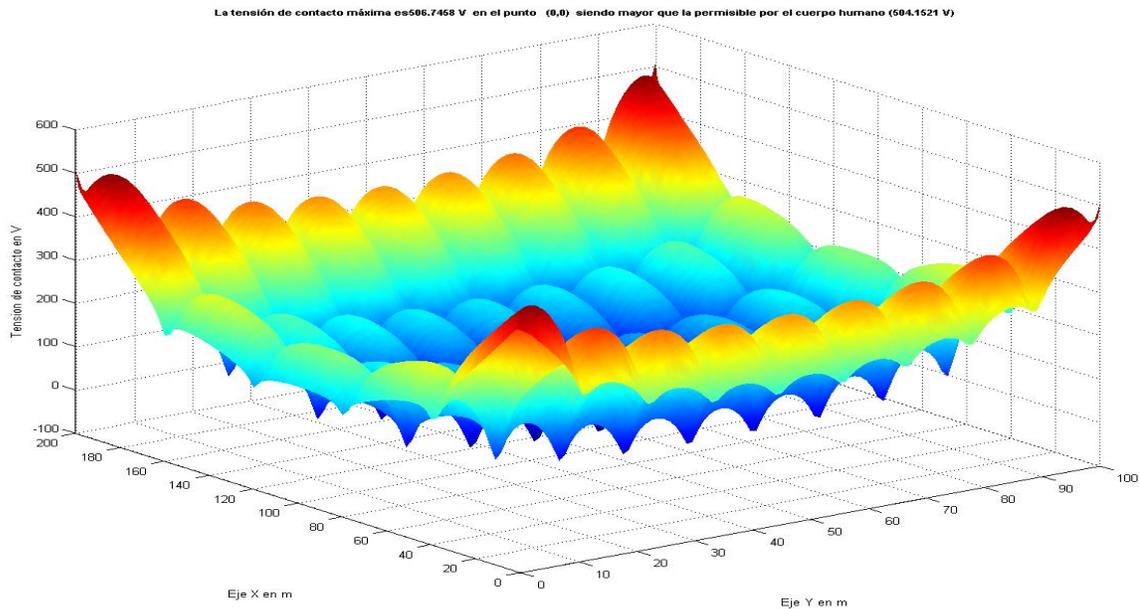


Figura 3.25. Potenciales de contacto del método de la IEEE (malla de 140x100 m²)

La tabla 3.9 resume la comparación entre ambos métodos.

Tabla 3.9. Comparación de resultados para ambos métodos

	IEEE	PAST Uniforme	PAST Optimizada
Longitud de conductor en m	2213	3260	1660
Potenciales de contacto en v	506.3458	501.2013	523.3436

En este caso la malla de la IEEE queda con menos conductores que la de reticulado uniforme obtenido con el PAST, pero 553 m más que la optimizada.

3.4.3 Malla de 160x100

Manteniendo los mismos datos generales y una corriente de 5635 A, la malla de 160x100 m², con el PAST se obtiene el reticulado que se aprecia en la figura 3.26, cuyos potenciales de contacto aparecen la figura 3.27, con un total de 2680 m de cable como indica la figura 3.28 de resultados finales.

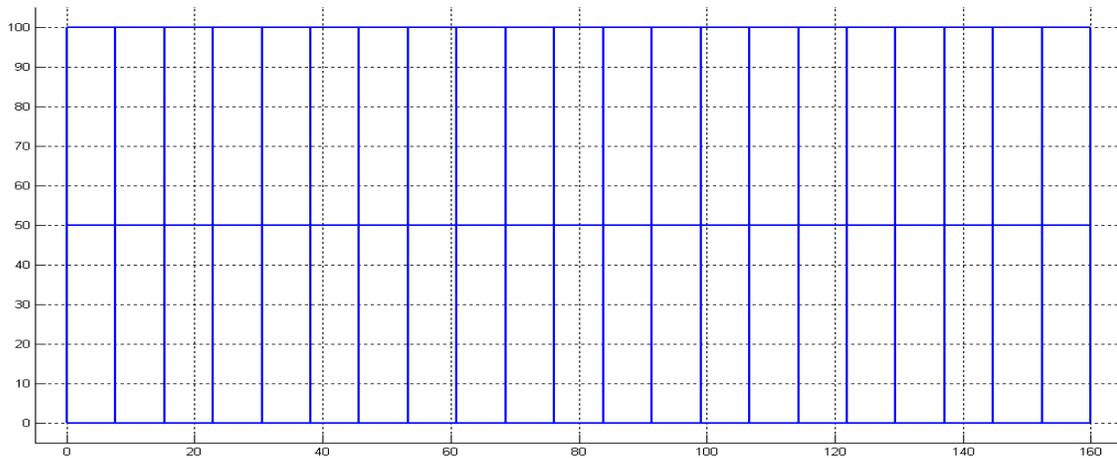


Figura 3.26. Reticulado uniforme de la malla de 160x100 m²

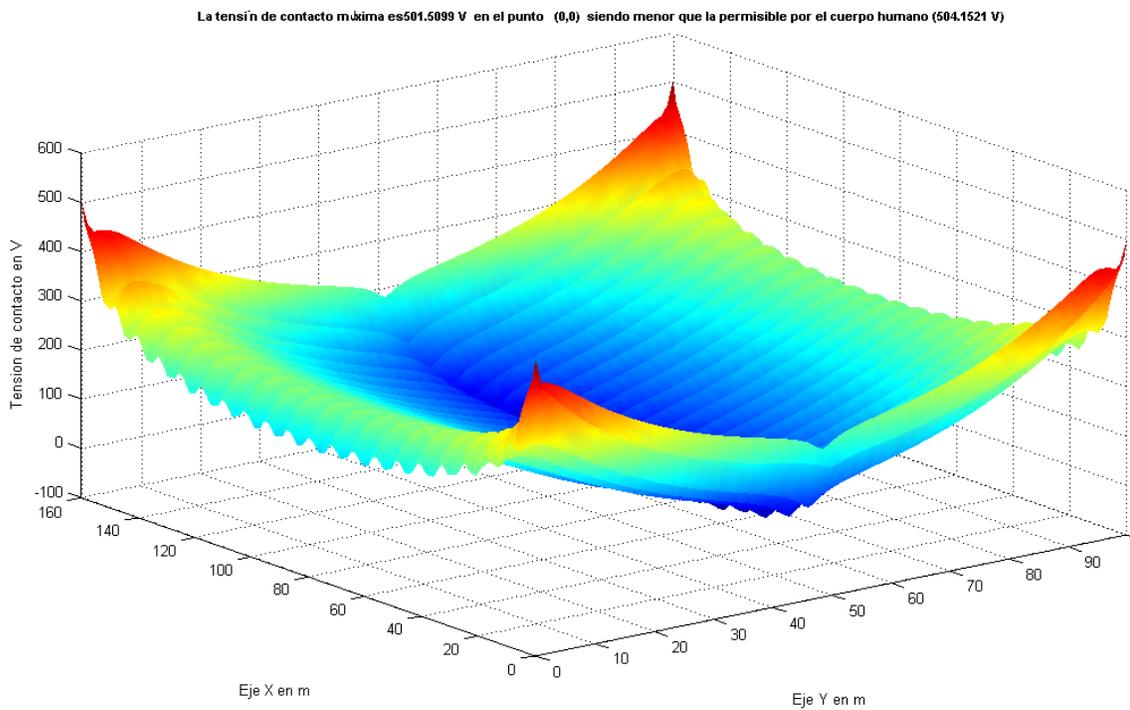


Figura 3.27. Potenciales de contacto de la malla de reticulado uniforme.

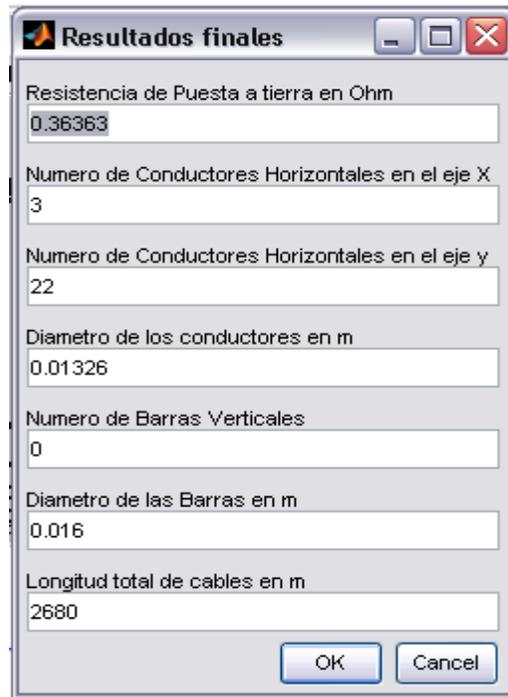


Figura 3.28. Resultados finales de la malla de reticulado uniforme.

Sometiendo esta malla de reticulado uniforme a un proceso de optimización se obtiene el reticulado que se muestra en la figura 3.29. Los potenciales de contacto para esta malla se aprecian en la figura 3.30, cuyos resultados finales en la figura 3.31 indican una longitud de conductor de 1680 m.

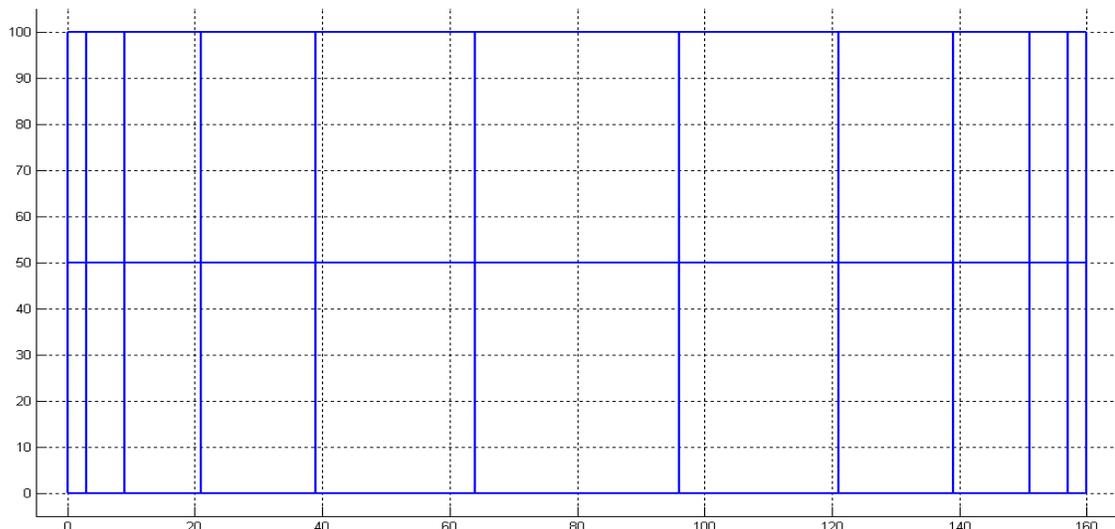


Figura 3.29. Reticulado de la malla optimizada.

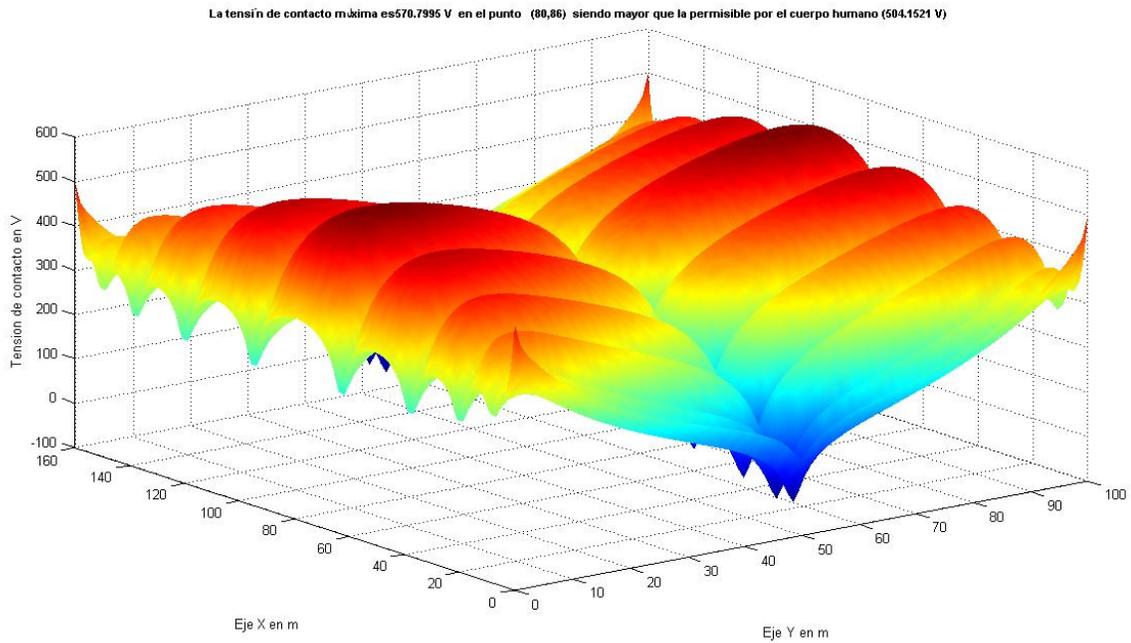


Figura 3.30. Potenciales de contacto de la malla optimizada.

Resultados finales de la Malla optimizada

Resistencia de Puesta a tierra en Ohm	0.37917
Número de Conductores Horizontales en el eje X	3
Número de Conductores Horizontales en el eje y	12
Diámetro de los conductores en m	0.02641
Número de Barras Verticales	0
Diámetro de las Barras en m	0.016
Profundidad de enterramiento en m	1
Longitud total de cables en m	1680

OK Cancel

Figura 3.31. Resultados finales de la malla optimizada.

Para esta malla el método de la IEEE proporciona los resultados que se muestran en la figura 3.32.

CALCULO DE LA RETICULA DE MALLA DE PUESTA A TIERRA			
Lado Mayor de la Malla	m		160,0
Lado Menor de la Malla	m		100,0
Espacio Entre Conductores Paralelos D	m		17,00
N° de Conductores Paralelos al Lado Mayor	-		10
N° de Conductores Paralelos al Lado Menor	-		7
Longitud Total del Conductor de la Malla L_c	m		2354,1
CALCULO DE LA TENSION DE TOQUE			
Tensión de Toque E_m	V		494,88
Resistividad del Suelo ρ	$\Omega.m$		100
Factor de Espaciamiento Para Tensión de Toque K_m	-		1,032
Factor Correctivo por Geometría de la Malla K_i	-		2,002
Máxima Corriente de la Malla I_G	A		5.636
Longitud Total del Conductor de la Malla L_c	m		2.354,1
RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA			
Resistencia de Puesta a Tierra R_g	Ω		0,390

Figura 3.32. Resultados obtenidos con el método de la IEEE

De forma análoga a la malla anterior a través del PAST se diseña la configuración de electrodo de la malla propuesta por el método de la IEEE para realizar un análisis de su potencial de contacto (Figura 3.33).

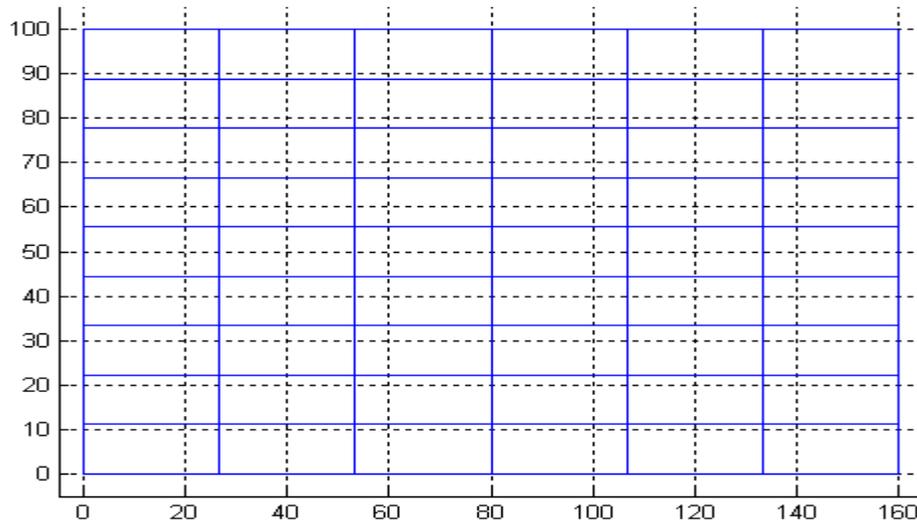


Figura 3.33. Configuración de electrodos método de la IEEE malla 160x100 m²

Atendiendo a esta configuración de electrodos en la figura 3.34 se muestra el potencial de contacto.

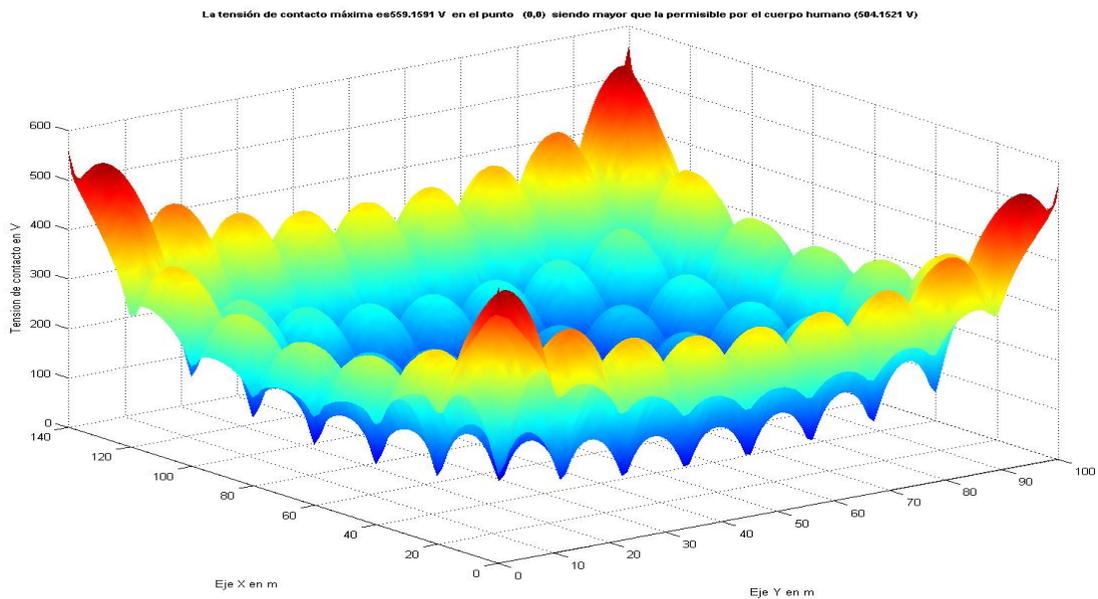


Figura 3.34. Potenciales de contacto del método de la IEEE (malla de 140x100 m²)

La tabla 3.10 resume una comparación entre ambos métodos, donde al igual que el ejemplo anterior el resultado de la IEEE es aparentemente mejor que el de reticulado uniforme, pero 74 m más que la malla optimizada.

Tabla 3.10. Comparación de resultados para ambos métodos

	IEEE	PAST Uniforme	PAST Optimizada
Longitud de conductor en m	2354	2680	1680
Potencial de contacto en v	559.1591	501.5099	570.7995

3.4.4 Malla de 180x100 m²

La malla de 180x100 m² con una corriente de 5990 A, con el PAST queda con el reticulado uniforme que se muestra en la figura 3.35, cuyos resultados finales y potenciales de contacto se muestran en las figuras 3.36 y 3.37.

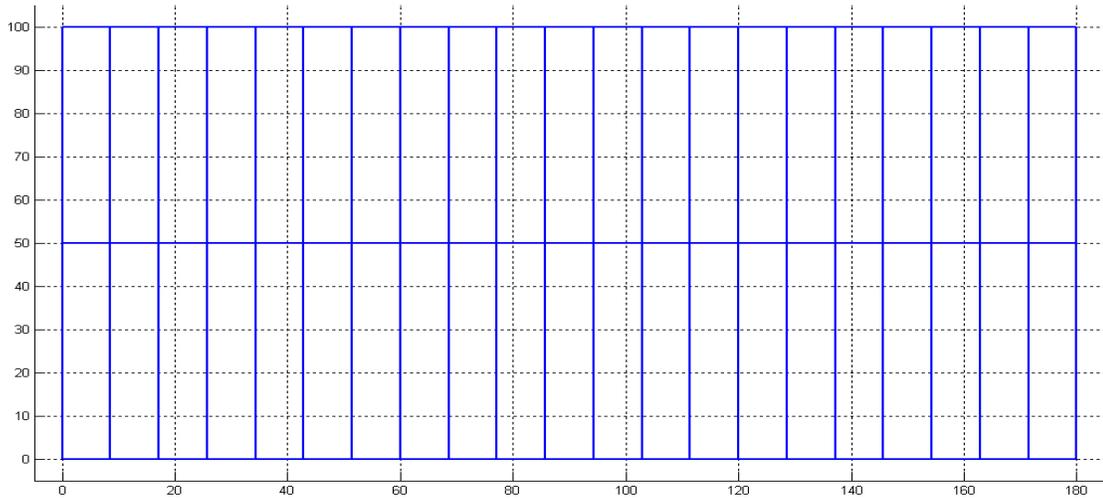


Figura 3.35. Malla de reticulado uniforme de 180x100 m².

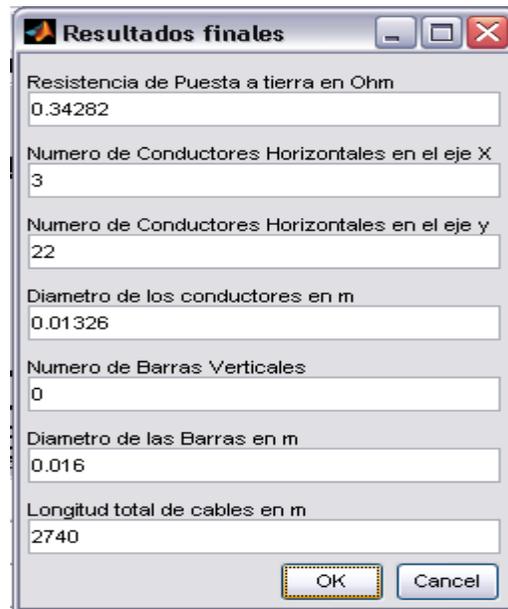


Figura 3.36. Resultados finales

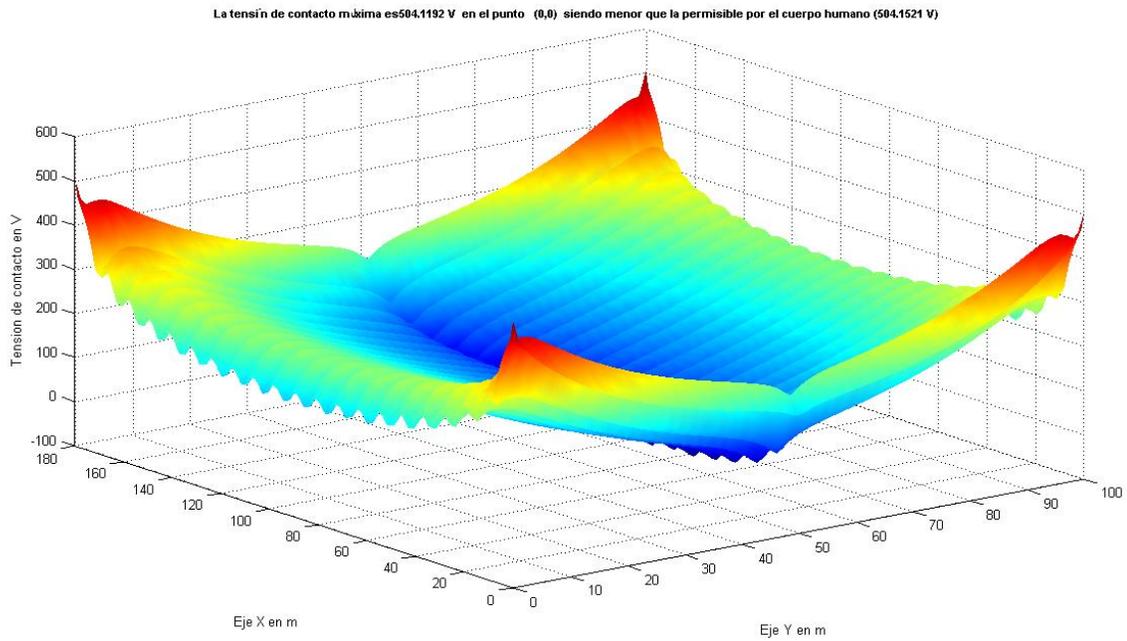


Figura 3.37. Potenciales de contacto.

Sometiendo esta malla al proceso de optimización queda con el reticulado que se muestra en la figura 3.38, con los resultados de la figura 3.39 y los potenciales de contacto de la figura 3.40.

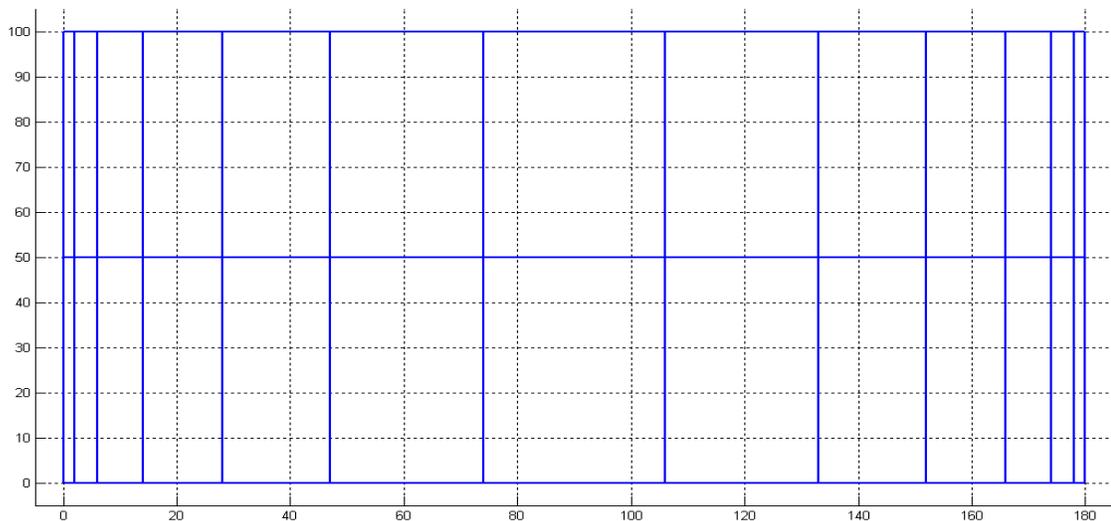


Figura 3.38. Malla optimizada de 180x100 m²

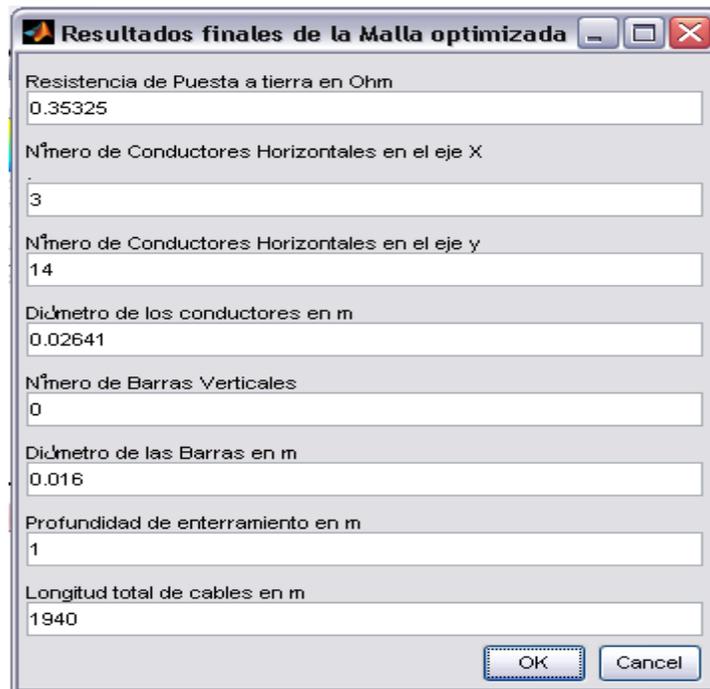


Figura 3.39. Resultados finales.

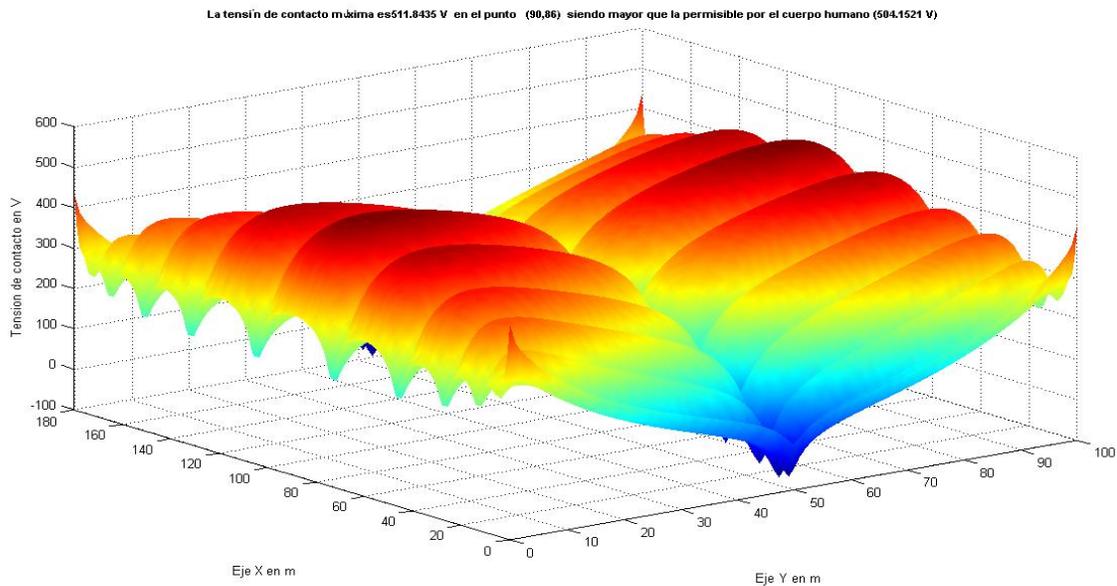


Figura 3.40. Potenciales de contacto de la malla optimizada.

Con el método de la IEEE los resultados se muestran en la figura 3.41.

CALCULO DE LA RETICULA DE MALLA DE PUESTA A TIERRA		
Lado Mayor de la Malla	m	180,0
Lado Menor de la Malla	m	100,0
Espacio Entre Conductores Paralelos D	m	19,00
N° de Conductores Paralelos al Lado Mayor	-	10
N° de Conductores Paralelos al Lado Menor	-	6
Longitud Total del Conductor de la Malla L_c	m	2511,6

CALCULO DE LA TENSION DE TOQUE		
Tensión de Toque E_m	V	501,18
Resistividad del Suelo ρ	$\Omega.m$	100
Factor de Espaciamiento Para Tensión de Toque K_m	-	1,051
Factor Correctivo por Geometría de la Malla K_f	-	2,000
Máxima Corriente de la Malla I_G	A	5.990
Longitud Total del Conductor de la Malla L_c	m	2.511,6

RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA		
Resistencia de Puesta a Tierra R_g	Ω	0,368

Figura 3.41. Resultados con el método de la IEEE

De forma análoga a la malla anterior a través del PAST se diseña la configuración de electrodo de la malla propuesta por el método de la IEEE para realizar un análisis de su potencial de contacto (Figura 3.42).

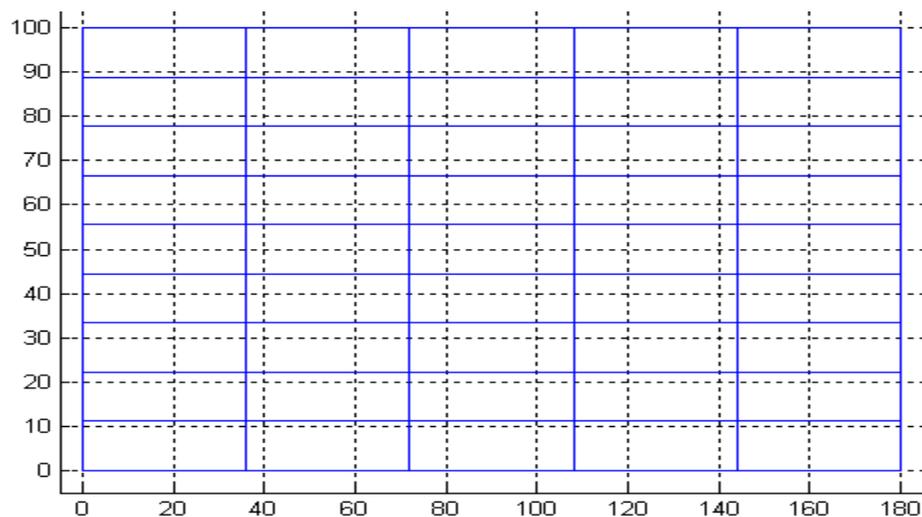


Figura 3.42. Configuración de electrodos método de la IEEE malla 180x100 m²

Atendiendo a esta configuración de electrodos en la figura 3.43 se muestra el potencial de contacto.

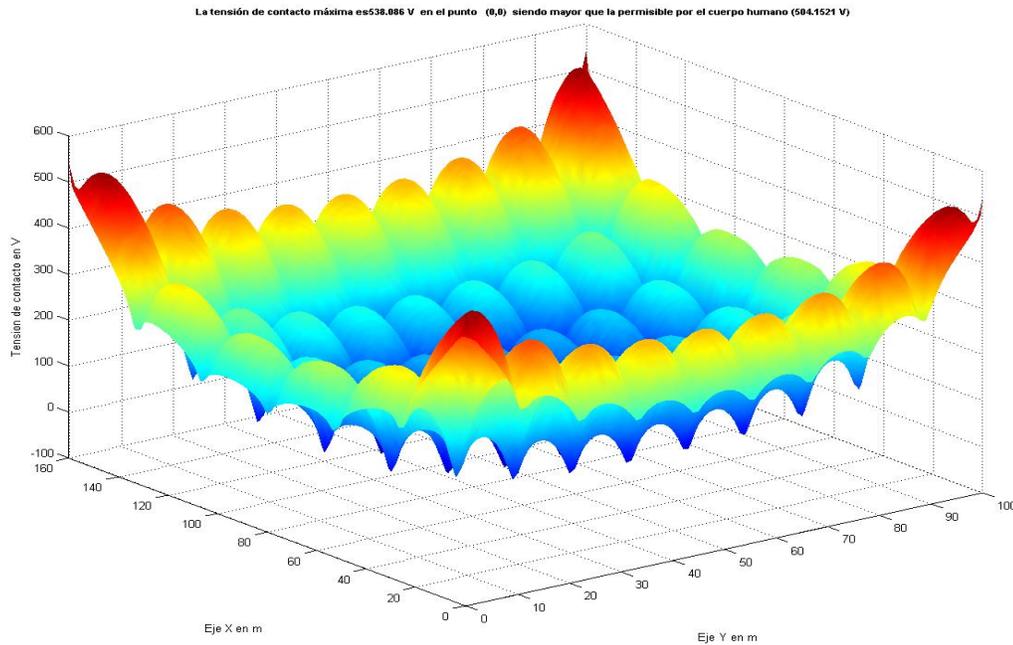


Figura 3.43. Potenciales de contacto del método de la IEEE (malla de 180x100 m²)

La Tabla 3.11 muestra la comparación entre ambos métodos para esta malla. Donde la diferencia entre la malla de la IEEE y la optimizada es de 571 m.

Tabla 3.11. Comparación de resultados obtenidos en longitud de cables en m.

	IEEE	PAST Uniforme	PAST Optimizada
Longitud de conductor en m	2511	2740	1940
Potencial de contacto en v	538.086	504.1192	511.8435

3.4.5 Malla de 200x100 m²

Para la malla 200x100 m² con una corriente de 6020 A, se obtiene con el PAST la malla de reticulado uniforme mostrada en la figura 3.44, con 2400 m de cable y con los potenciales de contacto que se muestran en la figura 3.45.

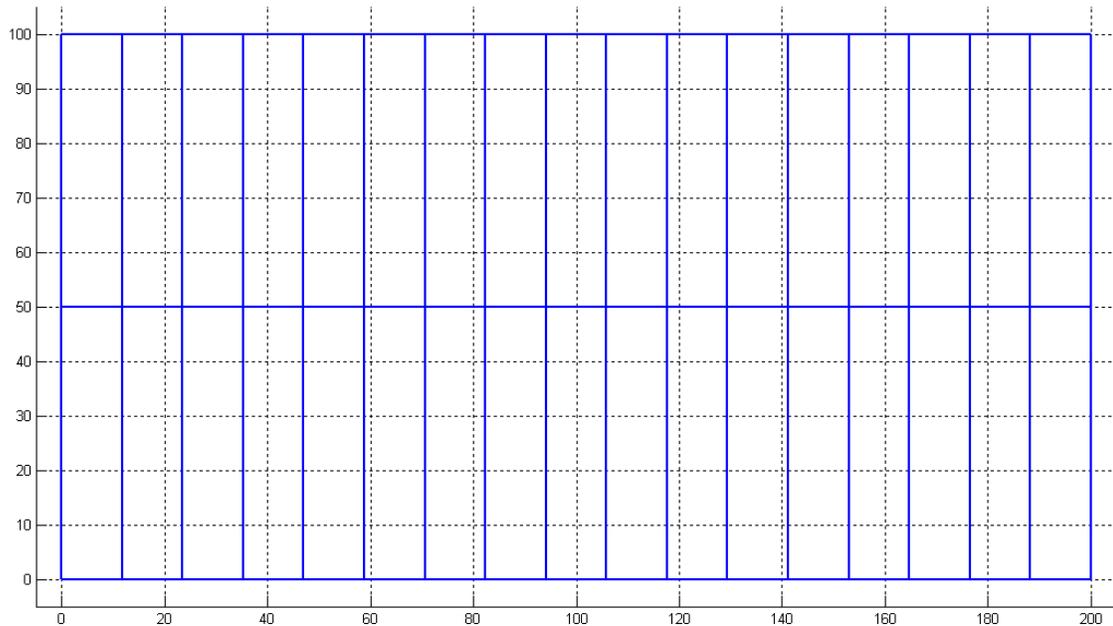


Figura 3.44. Malla de reticulado uniforme de 200x100 m².

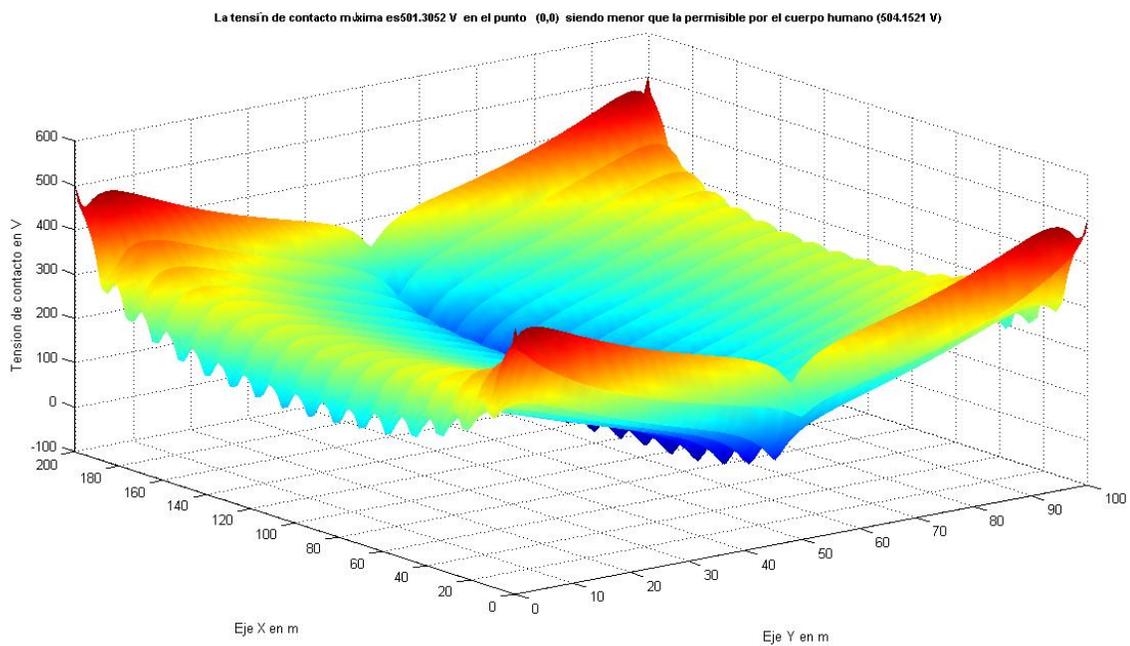


Figura 3.45. Potenciales superficiales.

Esta malla optimizada da los resultados que se muestran en la figura 3.46, cuyo reticulado y potenciales de contacto se muestran en las figuras 3.47 y 3.48.

The screenshot shows a window titled "Resultados finales de la Malla optimizada" with the following parameters:

Parámetro	Valor
Resistencia de Puesta a tierra en Ohm	0.3359
Número de Conductores Horizontales en el eje X	3
Número de Conductores Horizontales en el eje y	14
Diámetro de los conductores en m	0.02641
Número de Barras Verticales	0
Diámetro de las Barras en m	0.016
Profundidad de enterramiento en m	1
Longitud total de cables en m	2000

Figura 3.46. Resultados finales de la malla optimizada.

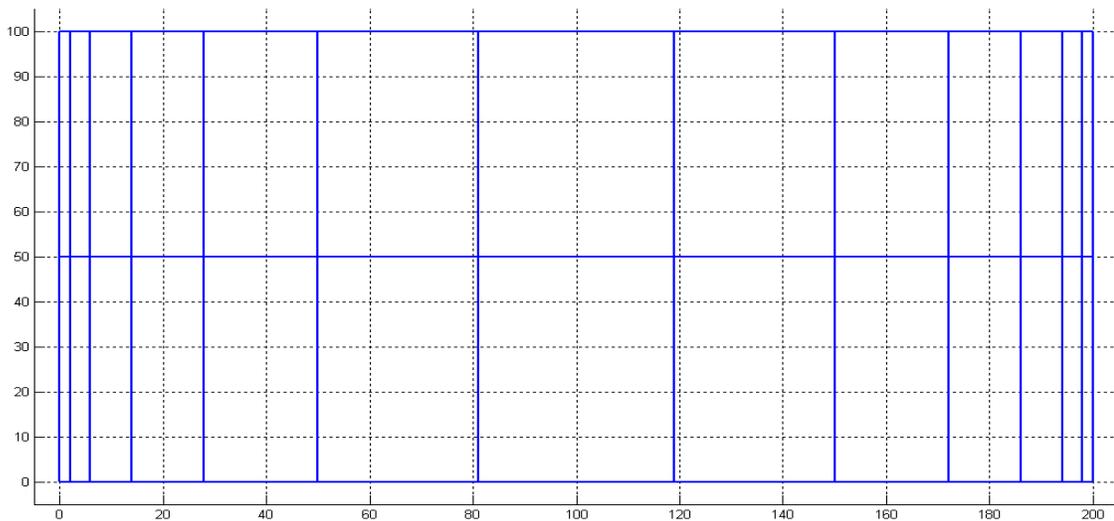


Figura 3.47. Reticulado de la malla optimizada.

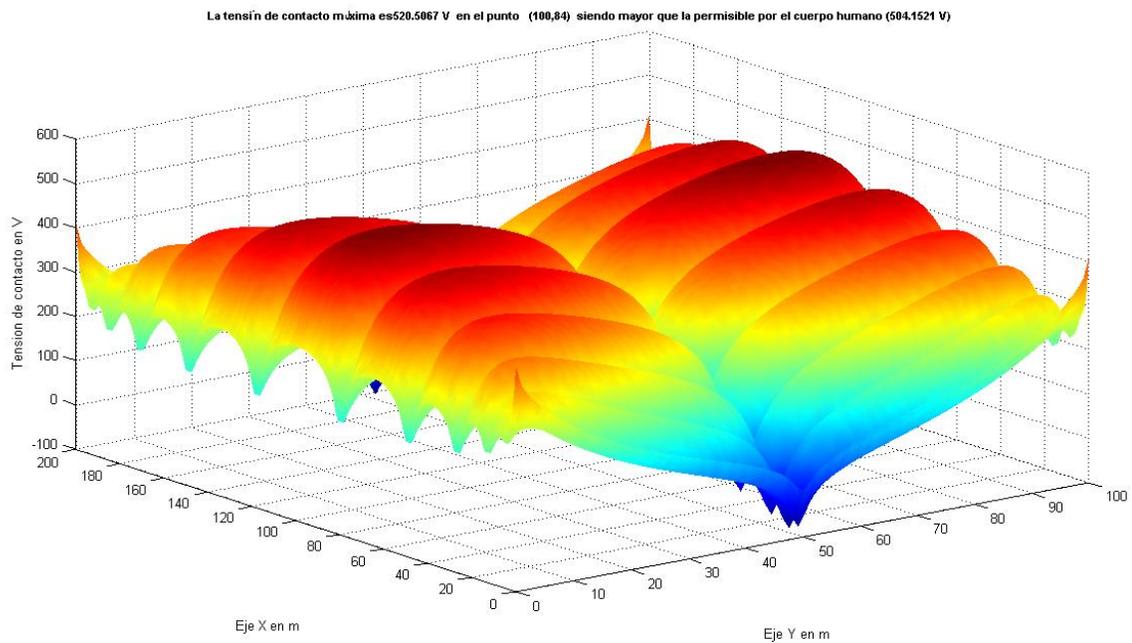


Figura 3.48. Potenciales de contacto de la malla optimizada.

Con el método de la IEEE se obtienen los resultados que se muestran en la figura 3.49.

CALCULO DE LA RETICULA DE MALLA DE PUESTA A TIERRA		
Lado Mayor de la Malla	m	200,0
Lado Menor de la Malla	m	100,0
Espacio Entre Conductores Paralelos D	m	22,00
Nº de Conductores Paralelos al Lado Mayor	-	10
Nº de Conductores Paralelos al Lado Menor	-	6
Longitud Total del Conductor de la Malla L_G	m	2572,7
CALCULO DE LA TENSION DE TOQUE		
Tensión de Toque E_m	V	501,69
Resistividad del Suelo ρ	$\Omega.m$	100
Factor de Espaciamiento Para Tensión de Toque K_m	-	1,099
Factor Correctivo por Geometría de la Malla K_i	-	1,951
Máxima Corriente de la Malla I_G	A	6.021
Longitud Total del Conductor de la Malla L_G	m	2.572,7
RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA		
Resistencia de Puesta a Tierra R_g	Ω	0,350

Figura 3.49. Resultados del método de la IEEE.

De forma análoga a la malla anterior a través del PAST se diseña la configuración de electrodo de la malla propuesta por el método de la IEEE para realizar un análisis de su potencial de contacto (Figura 3.50).

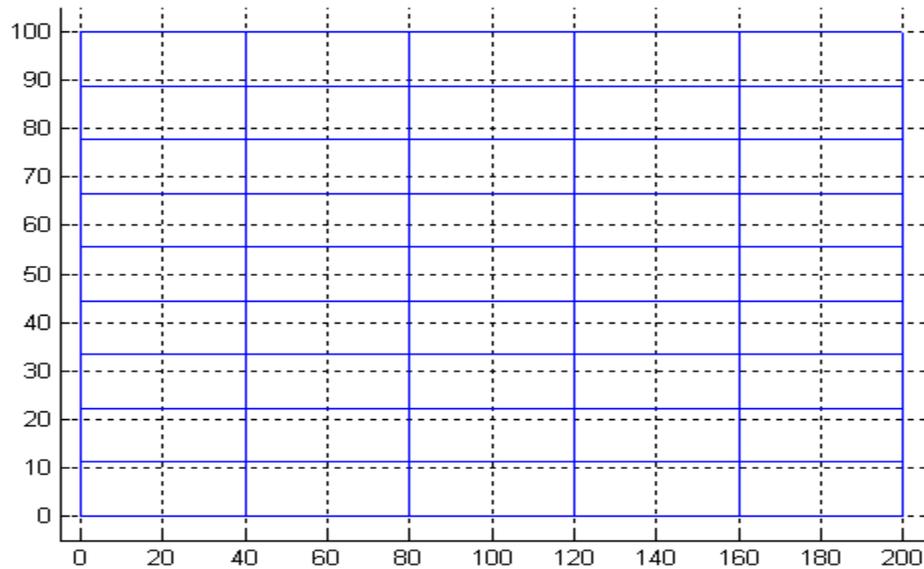


Figura 3.50. Configuración de electrodos método de la IEEE malla 200x100 m²

Atendiendo a esta configuración de electrodos en la figura 3.51 se muestra el potencial de contacto.

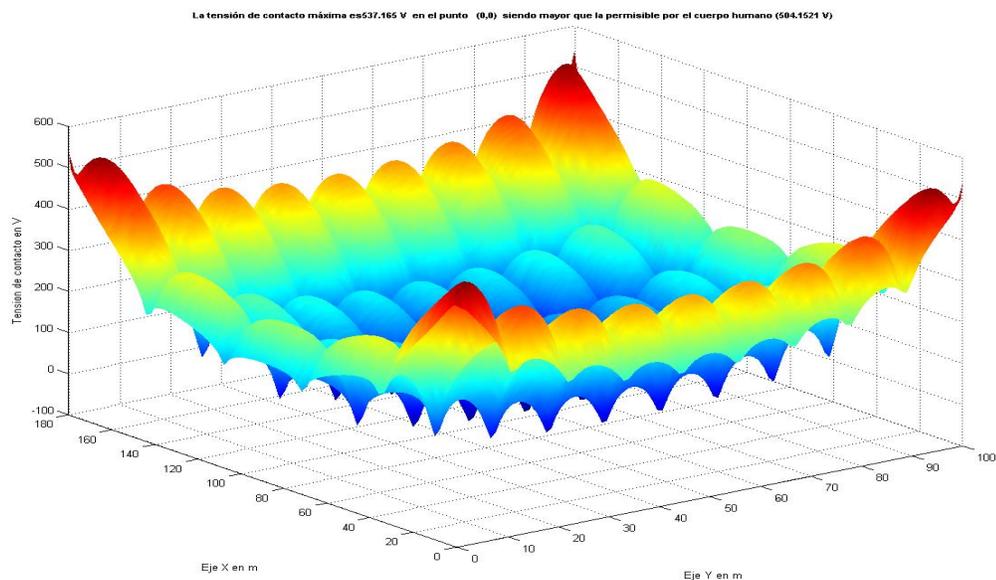


Figura 3.51. Potenciales de contacto del método de la IEEE (malla de 200x100 m²)

Para este ejemplo el método de la IEEE ofrece resultados inferiores a los del PAST en ambas propuestas, tabla 3.12.

Tabla 3.12. Comparación de resultados obtenidos en longitud de cables en m.

	IEEE	PAST Uniforme	PAST Optimizada
Longitud de conductor en m	2572	2400	2000
Potencial de contacto en v	537.165	501.3052	520.5067

3.5 Conclusiones del capítulo.

La tabla 3.13 resume los resultados obtenidos en el cálculo de la longitud de los cables de las mallas en ambos métodos.

Tabla 3.13. Resumen de los resultados obtenidos en longitud de cables en m.

	IEEE	PAST	
		Uniforme	Optimizada
110x100 m²	1683	1950	1840
140x100 m²	2213	3260	1660
160x100 m²	2354	2680	1680
180x100 m²	2511	2740	1940
200x100 m²	2572	2400	2000
Total	11333	13030	9120
Diferencia	2213		

Como se puede apreciar en la tabla 3.13. el método propuesto por la IEEE en su norma Std 80 del 2000 resulta menos económico en todos los ejemplos analizados que la malla optimizada por el PAST, garantizando valores adecuados resistencia de puesta a tierra y potenciales de contacto y superficiales .

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. El modelo de optimización propuesto permite la optimización no solo de la cantidad de conductores, si no también de diámetro del conductor y profundidad de enterramiento, lo cual garantiza una reducción importante en los costos.
2. El proceso de optimización propuesto e incorporado al programa PAST constituye una herramienta de gran utilidad del diseño de mallas de tierra, que supera en economía a la propuesta de la IEEE en su Std. 80/2000.

Recomendaciones

1. Hacer del PAST una herramienta de apoyo a utilizar por las empresas destinadas a realizar proyectos e instalaciones de sistemas de puesta a tierra.
2. Hacer una validación práctica del PAST que permita su uso en el diseño de mallas de tierra de Subestaciones de Potencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Schrage, L. (1997) Optimization Modeling with LINDO. Duxbury Press. Williams, H.P. (1999) Model Building in Mathematical Programming. 4th Edition. John Wiley and Sons.
- [2] Engineering, January, 1945.(Reprducido en Norma ANSI/IEEE Std 80-1986)
- [3] Engineering, 30 January, 2000 (Norma ANSI/IEEE Std.80/2000) Power Engineering Society.
- [4] A.I. Yakobs, S.I Kostruba, V.T. Zhivago, Calculo de Instalaciones de Puesta a Tierra Complejas Mediante Computadora Electrnicas, Elektrichestvo, No 8. 1967 (Traduccion Ruso-Español).
- [5] J. G. Sverak, "Optimized Grounding Grid Design Using Variable Spacing Technique", IEEE Trans., Vol. PAS-95, No. 1, January/February 1976.
- [6] P. Ortuondo, "Manual para el Proyecto y Análisis de Sistemas de Puesta a Tierra", Imprenta América Ltda. Chile, 1997, pp.5-61 – 5-65.
- [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] IEEE 80-2000 "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- [9] Almirall. J. L., "Temas de Ingeniería Eléctrica", Tomo II. Editorial Pueblo y Educación. Habana, Cuba.
- [10] IEEE 80-2000 "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- [11] S. Stefanescu, C. et M. Schlumberger, Journal Physique et le Radium, vol. 11.1930
- [12] Garrett, D.L., Holley, H.J., Calculation of Substation Grounding System Resístanse Ucing Matriz Techniques, IEEE Trans., Vol. PAS-99, No. 5 Sept/Oct 1980.