



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

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



TRABAJO DE DIPLOMA

Programa para diseñar sistemas de puesta a tierra por la norma de la IEEE Std 80 del 2000

Autor: Víctor Rolando Jara González

Tutores: Dr. C. Ángel Cecilio Valcárcel Rojas

Ing. Asdrúbal Pérez Triana

Santa Clara

2015

"Año 57 De La Revolución"



Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



Trabajo de Diploma

Programa para diseñar sistemas de puesta a tierra
por la norma de la IEEE Std 80 del 2000

Autor: Víctor Rolando Jara González

e-mail: vjara@uclv.edu.cu

Tutores: Dr. C. Ángel Cecilio Valcárcel Rojas

Profesor Titular del Departamento de Electroenergética

Facultad de Ingeniería Eléctrica

e-mail: valca@uclv.edu.cu

Ing. Asdrúbal Pérez Triana

e-mail: asdrubal@obeccambas.eleccav.une.cu

Santa Clara

2015

“Año 57 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

“Emplearse en lo estéril cuando se puede hacer algo útil; ocuparse en lo fácil cuando se tiene bríos de intentar lo difícil, es despojar de su dignidad al talento. Todo el que deja de hacer lo que es capaz de hacer, peca.”

José Martí

DEDICATORIA

A toda mi familia, por estar siempre a mi lado; por apoyarme, por aconsejarme y por enseñarme todo lo bueno de la vida.

A mis padres, por brindarme siempre todo su amor y darme todos los gustos.

A mis abuelos y mi bisabuela, los cuales han sido en mi vida como más que padres. Especialmente a ellos dedico este trabajo.

A mi hermana, para que siga mi ejemplo en los estudios y por darme siempre su cariño y amor incondicional.

A mis amigos de toda la vida, por estar siempre presentes.

A mis amigos de la universidad, de mi aula y de mi cuarto, por enseñarme algo nuevo cada día y por haber compartido con ellos momentos inolvidables.

A los que considero mis hermanos, por estar siempre a mi lado.

A Claudia Companioni, por haber vivido con ella momentos inolvidables y enseñarme a llevar siempre el amor al lado de la amistad.

A la memoria de las personas que ya no están presentes, y que de cierta forma contribuyeron alguna vez a mi formación como persona y profesional.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer de manera especial a Dios, por ser mi creador, mi guía y la luz que alumbra en todo momento los caminos de mi vida.

A mi familia por darme todo el apoyo moral y material en mi vida, especialmente en mi etapa de la universidad. Gracias por su amor.

A mi tutor y amigo Dr. C. Ángel Valcárcel Rojas, por haber sido un ejemplo de excelente profesor y haber hecho posible la realización de este trabajo.

A todos mis profesores por aportarme siempre valores éticos y profesionales en el camino universitario.

A todas las personas que de una forma u otra han contribuido en mi formación como profesional; desde mis inicios en la escuela hasta los días de hoy.

A mis amigos verdaderos por apoyarme siempre en todo momento.

A todos **Muchas Gracias**

TAREA TÉCNICA

1. Hacer una revisión de la norma IEEE Std 80 del 2000.
2. Desarrollar los algoritmos necesarios para implementar en un programa en MatLab la metodología que se propone en la norma.
3. Implementar en el programa desarrollado los ejemplos necesarios para validar el mismo.
4. Comparar la metodología propuesta por la IEEE en su norma Std 80 del 2000 con la metodología propuesta en el programa PAST.
5. Confección del informe.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

Los sistemas de puesta a tierra constituyen uno de los elementos fundamentales de los sistemas eléctricos, por lo que su correcto diseño y funcionamiento contribuyen a una mejor explotación de la instalación en cuestión y asegura de manera primordial la vida del personal trabajador de la misma. Gracias al desarrollo computacional en la actualidad, se puede hacer un mejor diseño de sistemas de puesta a tierra, garantizando exactitud, simulaciones complejas, y una visualización gráfica muy detallada de las variables deseadas.

En este trabajo se implementó un nuevo programa (STI 1.0) para analizar, proyectar y simular sistemas de puesta a tierra, mediante el método aproximado de la IEEE Std 80 del 2000, el cual será usado como medio de enseñanza en la asignatura de Sistemas de Puesta a tierra y conjuntamente con el PAST (anteriormente creado en el Centro de Estudios Electroenergéticos), un medio de comparación de variables técnico-económicas cuando se desee proyectar una instalación eléctrica en la realidad.

Después de hacer una nueva revisión de las propuestas de la norma, se arriba a la conclusión que el STI 1.0 está validado para hacer un estudio gráfico, técnico y económico de la misma, y que puede ser usado con fines docentes-profesionales.

TABLA DE CONTENIDOS

<i>PENSAMIENTO</i>	i
<i>DEDICATORIA</i>	ii
<i>AGRADECIMIENTOS</i>	iii
<i>TAREA TÉCNICA</i>	iv
<i>RESUMEN</i>	v
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA	4
1.1 Definiciones.....	4
1.1.1 Tierra.....	4
1.1.2 Puesta a tierra	4
1.1.3 Poner a tierra	5
1.1.4 Conectar a tierra.....	5
1.1.5 Tierra remota o de referencia.....	5
1.1.6 Conductores de tierra	5
1.1.7 Conductores de protección.....	5
1.1.8 Electrodo vertical.....	5
1.1.9 Bornes de puesta a tierra.....	6

1.1.10	Malla de tierra	6
1.1.11	Resistencia de tierra	6
1.1.12	Tensión de paso	7
1.1.13	Tensión de contacto.....	7
1.1.14	Resistividad del terreno	8
1.1.15	Tensión de paso tolerable.....	8
1.1.16	Tensión de contacto tolerables	8
1.2	Basamentos fundamentales de la norma IEEE Std 80 del 2000.....	8
1.2.1	Objetivos.....	8
1.2.2	Limitaciones	9
1.2.3	Normativa	9
1.2.4	Clasificación	9
1.3	Estudio de suelos	10
1.3.1	Capas composicionales	10
1.3.2	Resistencia de propagación de los terrenos.....	12
1.4	Resistividad del terreno	13
1.4.1	Efectos de la humedad, temperatura y la sal en la resistividad	15
1.4.2	Factores principales que influyen en la resistividad del terreno	16
CAPÍTULO 2.	ANÁLISIS DE LA NORMA IEEE Std 80 - 2000	17
2.1	Expresiones y criterios fundamentales	17
2.1.1	Corriente máxima a disipar por la malla (IG).....	18
2.1.2	Corriente simétrica de falla a tierra (IF)	18
2.1.3	Factor de decremento (Df).....	19
2.1.4	Factor de crecimiento (Cp)	20

2.1.5	Factor de división de corriente (S_f)	20
2.1.6	Duración de la falla (t_f) y duración del choque (t_s)	22
2.1.7	Geometría de la malla	23
2.1.8	Resistividad de la capa superficial (ρ_s)	23
2.1.9	Resistividad del terreno (ρ)	25
2.1.10	Investigación de la estructura del suelo.....	25
2.1.11	Medidas de resistividad.....	26
2.1.12	Interpretación de las medidas de resistividad del suelo	28
2.1.13	Selección del tamaño del conductor	31
2.1.14	Criterios de tensiones de paso y toque tolerables	34
2.1.15	Evaluación del potencial de tierra (GPR)	36
2.2	Cálculo de las tensiones reales de la malla.....	36
2.2.1	Tensión de contacto máxima de la malla (T_{cr})	36
2.2.2	Tensión de paso máxima de la malla (T_{pr}).....	38
2.3	Cálculo de la resistencia de puesta a tierra	39
2.3.1	Cálculos simplificados	40
2.3.2	Cálculos en terrenos homogéneos	41
2.3.3	Cálculo en terrenos de dos capas.....	42
2.4	Tratamiento del suelo para obtener resistividad más baja.....	44
2.5	Consideraciones para diseñar la malla.....	44
2.5.1	Refinamiento del diseño preliminar	44
2.5.2	Conexiones de la malla.....	46
2.5.3	Procedimiento para el diseño.....	48
2.6	Implementación del programa.....	50

2.6.1	Características básicas del programa	50
2.6.2	Secuencia lógica de los cálculos realizados	52
CAPÍTULO 3. VALIDACIÓN DEL STI 1.0. STI Vs. PAST		54
3.1	Ejemplos de la Norma IEEE 80-2000	54
3.1.1	Ejemplo de malla cuadrada sin varillas	54
3.1.2	Ejemplo de malla rectangular con varillas de tierra.....	63
3.2	Comparación del STI 1.0 con el PAST 1.0	66
3.2.1	Ejemplo comparativo	66
3.3	Conclusiones del capítulo	69
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		70
Conclusiones		70
Recomendaciones		71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		72

INTRODUCCIÓN

Un elemento fundamental y de gran importancia dentro de los sistemas eléctricos de transmisión, y hoy día dentro de todo sistema eléctrico seguro, es el sistema de puesta a tierra. Alrededor del primer cuarto del siglo XX en Francia, debido a que se conocían los riesgos de electrificación en los seres humanos, sobre todo con la corriente alterna, se impone una norma relativa a la puesta a tierra. Esta norma no daba ninguna indicación sobre las condiciones de la puesta a tierra ni sobre el valor de la resistencia de toma de tierra. En general se trataba de condiciones de instalación. Si bien en tiempos anteriores se consideraba el problema de la puesta a tierra como un problema resistivo y en régimen permanente, se sabe que las fallas pueden darse a altas frecuencias o en magnitudes muy altas en un período muy corto de tiempo, como por ejemplo cuando se da el impacto de un rayo en una línea de transmisión. Hoy día se tiene plena conciencia de los efectos del paso de una corriente eléctrica por el cuerpo humano y la importancia de la puesta a tierra de los sistemas eléctricos para salvaguardar la vida así como también los bienes materiales. Por otro lado el suministro de la energía eléctrica que requiere una sociedad moderna es necesario instalar centrales generadoras, líneas de transmisión, subestaciones y líneas de distribución, elementos cada vez más integrados físicamente a la comunidad. Considerando esta relación íntima y frecuente entre el hombre y las instalaciones eléctricas, es imprescindible tomar las medidas requeridas para reducir al mínimo los riesgos a que puedan quedar sometidas las personas por un efecto directo o indirecto de estas instalaciones.

El crecimiento natural de los sistemas de generación y transmisión, tanto de magnitud de potencia instalada como en los niveles de voltaje de sus líneas y

subestaciones, ha hecho necesario efectuar una revisión, implementación y comparación de normas técnicas propuestas por varias organizaciones prestigiosas a nivel mundial y después de tal evaluación, poder decidir entre la mejor variante técnico-económica para llevarla a la práctica.

La norma técnica analizada en este trabajo es la referente a la IEEE Std 80 del 2000 [1], la cual plantea un método de cálculo aproximado y un diseño uniforme de la malla de puesta a tierra. Mediante el uso de la computación, programas especializados como MatLab [2], y siguiendo la lógica de algoritmos de programación [3], se implementa en este trabajo un programa para el estudio gráfico de dicha norma, logrando una mejor familiarización de los estudiantes con el análisis y diseño de sistemas de puesta a tierra. El programa hace uso de un método de programación sumamente práctico que regula en sus cálculos los niveles de tensión de paso y contacto reales hacia los mínimos tolerables por el cuerpo humano y ajusta la malla de manera tal que alcanza la resistencia de puesta a tierra deseada.

Para realizar este trabajo se hizo necesario plantear la siguiente situación problemática: ***¿Cómo desarrollar algoritmos necesarios para implementar en un programa en MatLab la metodología que propone la norma IEEE Std 80 del 2000?***

Para buscar la solución correcta a esta problemática, se trazó el siguiente **objetivo general**:

Desarrollar un programa en MatLab que permita el cálculo de mallas de puesta a tierra basado en la metodología de la norma IEEE Std 80 del 2000.

Derivándose de este, los siguientes **objetivos específicos**:

- Diseñar una interfaz gráfica en MatLab, que permita la introducción adecuada de datos.
- Desarrollar una metodología de programación que facilite los cálculos del programa.

- Programar los algoritmos matemáticos expuestos en la norma IEEE Std 80 del 2000.
- Validar el programa con los ejemplos propuestos por la norma.
- Comparar la metodología de la norma IEEE Std 80 del 2000 con la implementada en el PAST 1.0.

Organización del informe

El presente trabajo está estructurado de la siguiente manera:

Primer Capítulo: Sistemas de Puesta a Tierra.

Se enuncian conceptos y definiciones fundamentales de los sistemas de puesta a tierra. Se hace referencia a los objetivos y limitaciones propuestas por la norma tratada en este trabajo; así como un estudio previo de ciertas variables que la misma considera sumamente importantes a la hora de implementar su contenido.

Segundo Capítulo: Análisis de la norma IEEE Std 80 del 2000.

Se hace un estudio detallado de las consideraciones establecidas por dicha norma, especialmente de las expresiones matemáticas, procedimientos de cálculo y estudio de coeficientes característicos para lograr un correcto diseño final.

Tercer Capítulo: Implementación y validación del programa.

Se implementa una metodología de programación capaz de satisfacer las necesidades del usuario, especialmente a la hora de introducir los datos en la interfaz gráfica, rapidez, efectividad y exactitud de los cálculos. Se hace una validación del programa por los ejemplos propuestos en la norma, y se hace también una comparación con el método propuesto por el PAST.

CAPÍTULO 1. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

Los sistemas de puesta a tierra, contribuyen de forma importante a la protección y el buen funcionamiento de los sistemas de energía eléctrica. Prácticamente todos los equipos eléctricos y electrónicos necesitan estar conectados a una red de puesta a tierra, por lo que se hace necesario tener presente los conceptos y definiciones fundamentales en esta rama de la electricidad, con el fin de hacer un buen trabajo en la vida profesional y aplicarlos a su vez en la práctica cotidiana.

1.1 Definiciones

Es conveniente definir algunos términos usados frecuentemente para referirse al proyecto y análisis de sistemas de puestas a tierra, ya que son usados en este trabajo, y en la práctica son de vital importancia para evitar confusión, principalmente entre ingenieros diseñadores y técnicos montadores de dichos sistemas. Se ha tratado que estas definiciones no se aparten de las habituales utilizadas en la literatura correspondiente y en las normas más conocidas e importantes. Se ha preferido indicar las definiciones en un orden lógico y no alfabético. [\[1\]](#) [\[4\]](#) [\[5\]](#)

1.1.1 Tierra

Es la masa conductiva del terreno como un todo.

1.1.2 Puesta a tierra

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

metálicos que se encuentran en una instalación sobre el terreno o en el terreno mismo. [6]

1.1.3 Poner a tierra

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

1.1.4 Conectar a tierra

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

1.1.5 Tierra remota o de referencia

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

1.1.6 Conductores de tierra

Se conoce como línea de enlace o conductores de tierra a los que conectan al conjunto de electrodos o anillo con el borne principal o punto de puesta a tierra.

1.1.7 Conductores de protección

Los conductores de protección unen las masas de una instalación y los elementos metálicos que puedan existir, como cañerías, calderas, etc. y cualquier otra masa importante del edificio, con las líneas de tierra. [7]

1.1.8 Electrodo vertical

Es el constituyente más simple de una puesta a tierra destinado a proporcionar un contacto con tierra. Consiste generalmente en una varilla de cobre (jabalina), enterrado en forma vertical, como se puede apreciar en la **Figura. 1.1**. Una puesta

a tierra puede estar constituida por un solo electrodo o por una combinación de electrodos. [4]

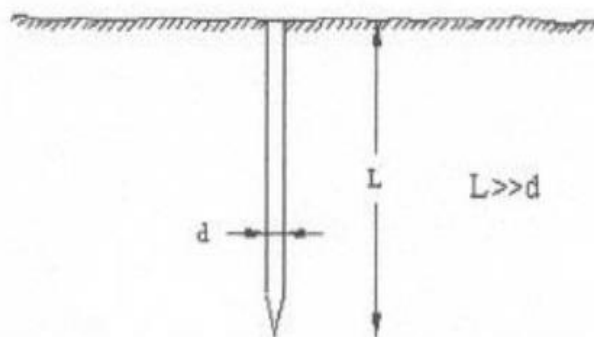


Figura. 1.1. Electrodo vertical.

1.1.9 Bornes de puesta a tierra

Los bornes de puesta a tierra forman el punto de unión entre la toma de tierra y el circuito de puesta a tierra de una instalación.

1.1.10 Malla de tierra

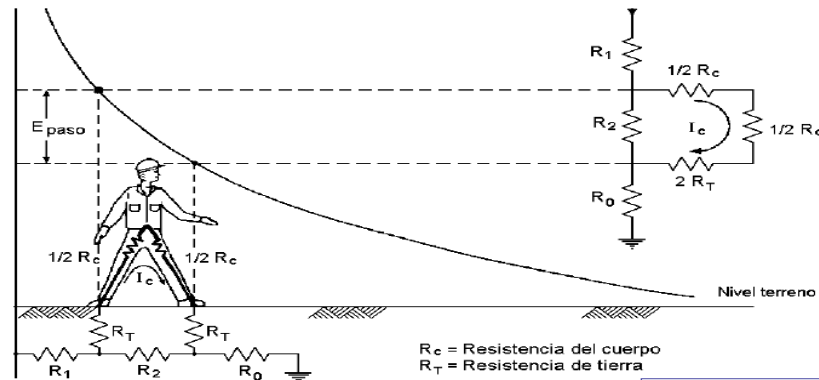
Es una puesta a tierra común a todos los elementos metálicos y circuitos de una instalación o parte claramente definida de la instalación. Tiene como objetivo el poseer un adecuado valor de resistencia y además controlar las sollicitaciones de voltaje a que pueden quedar sometidas las personas, en el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

1.1.11 Resistencia de tierra

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

1.1.12 Tensión de paso

Es la diferencia de potencial entre dos puntos de un terreno que pueden ser tocados simultáneamente por ambos pies una persona. En la **Figura. 1.2** se puede apreciar un esquema que evidencia gráficamente el significado del potencial de paso. [8] [9]

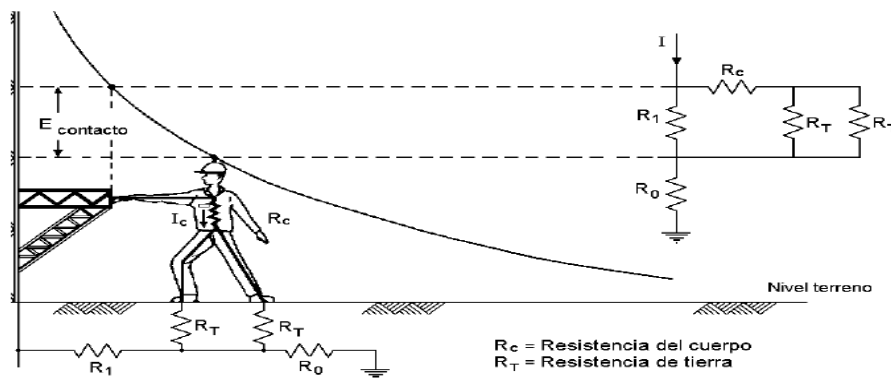


IEEE Std 80-2000

Figura. 1.2. Esquema gráfico del potencial de paso.

1.1.13 Tensión de contacto

Es la diferencia de potencial entre un punto en la superficie del terreno y cualquier otro punto que se pueda ser tocado simultáneamente por una persona, generalmente entre manos y pies. En la **Figura. 1.3** se puede observar un esquema que evidencia gráficamente el significado del potencial de contacto. [8] [9]



IEEE Std 80-2000

Figura. 1.3. Esquema gráfico del potencial de contacto.

1.1.14 Resistividad del terreno

La resistividad eléctrica del suelo describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. El suelo es una mezcla de rocas, gases, agua y otros minerales orgánicos e inorgánicos. Esta mezcla hace que la resistividad del terreno aparte de depender de su composición interna, dependa de otros factores externos como son la temperatura, la humedad, el contenido de sales, etc., que pueden provocar que el mismo suelo presente resistividades diferentes con el tiempo.

1.1.15 Tensión de paso tolerable

Es la máxima diferencia de potencial que puede experimentar una persona caminando en la superficie de la subestación o en sus alrededores al momento de ocurrir una falla. Esta diferencia de potencial se toma entre dos puntos separados a una distancia de un metro.

1.1.16 Tensión de contacto tolerables

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

1.2 Basamentos fundamentales de la norma IEEE Std 80 del 2000

Una instalación de puesta a tierra tiene por objeto las siguientes funciones y objetivos básicos:

1.2.1 Objetivos

- **Seguridad de la personas**
- Protección de las instalaciones
- Mejora de la calidad de servicio
- Permanencia del potencial de referencia

1.2.2 Limitaciones

- Limitar la diferencia de potencial que, en un momento dado, puede presentarse entre estructuras metálicas y tierra.
- Posibilitar la detección de defectos a tierra y asegurar la actuación y coordinación de las protecciones, eliminando o disminuyendo, así, el riesgo que supone una avería para el material utilizado y las personas.
- Limitar las sobretensiones internas (de maniobra -transitorias- y temporales) que puedan aparecer en la red eléctrica, en determinadas condiciones de explotación.

1.2.3 Normativa

“Toda instalación eléctrica deberá disponer de una protección o instalación de tierra diseñada de forma tal que, en cualquier punto normalmente accesible, interior o exterior, donde las personas puedan circular o permanecer, estas queden sometidas, como máximo a las tensiones de paso y contacto tolerables, durante cualquier defecto en la instalación”. [10]

1.2.4 Clasificación

Una instalación de puesta a tierra tiene 2 clasificaciones:

1ra Clasificación:

- Instalación **ARTIFICIAL** de puesta a tierra.- Se construyen específicamente utilizando los materiales adecuados (varillas, placas, conductores, etc.)
- Instalación **NATURAL** de puesta a tierra.- Elementos de otros sistemas técnicos: cimientos, estructuras metálicas, vías férreas, canalizaciones de agua, etc.

2da Clasificación:

- Instalaciones de puesta a tierra de **SERVICIO**.- Satisfacen requerimientos técnicos de operación (por ejemplo: Neutro a tierra)

- Sistema de tierra de **PROTECCIÓN**.- Para asegurar que la corriente a tierra no cause daño a personas o equipos. Las cuales también se clasifican en:
 - **Simples**: Cuando la corriente y el área son pequeñas.
 - **Mallas**: Cuando la corriente y el área son grandes.

1.3 Estudio de suelos

Los suelos no constituyen una masa sólida indivisible, sino que en su análisis encontramos diversos componentes sólidos, líquidos y gaseosos, que ocupan los espacios porosos. Estos presentan características propias que, en la mutua influencia que se ejercen y en las diferentes cantidades de sus componentes, le proporcionan a aquellos, sus particulares características y propiedades.

1.3.1 Capas composicionales

La división se debe a las densidades de estratificación que tuvieron lugar en las primeras etapas de formación de la tierra. Se reconocen tres regiones:

Corteza: Es una capa rígida más externa de la tierra, tiene un espesor variable dependiendo si esta es:

- **Corteza Oceánica**.- Está compuesta por rocas ígneas en sus cordones montañosos, en donde puede tener un grosor de 3 a 15 Km. Las rocas de la corteza oceánica son más jóvenes y densas que las de la corteza continental.
- **Corteza continental**.- es la parte de la corteza terrestre que forma los continentes. Es más gruesa que la corteza oceánica, su espesor puede ser de hasta 40 km y está compuesta principalmente por granito. La corteza continental está formada por tres tipos de rocas: Ígneas, sedimentarias o metamórficas.

Se puede resumir las siguientes características de la **corteza**:

- Grosor medio inferior 20 Km

- Grosor en continentes 30 Km a 70 Km en montañas
- Grosor en océanos 3 a 15 Km
- Rocas continentales 2.8 g/cm^3 de edades de 3800 M.A
- En la corteza continental se tiene sílice, potasio, sodio entre otros
- Corteza oceánica 3.0 g/cm^3 de 1800 M.A. (Basalto)

Manto: En el manto se concentra el 82% del volumen de la tierra. Es una capa rocosa y sólida rica en sílice, se extiende por una profundidad de 2885 Km. El límite corteza-manto refleja un cambio de composición. Las rocas del manto se divide en:

- **Manto inferior o mesosfera.**- Se extiende del límite Núcleo – manto, hasta una profundidad de 660 Km.
- **Manto superior.**- Continúa hasta la base de la corteza.

Se puede resumir las siguientes características del **manto**:

- Es una capa gruesa
- 2900 Km de espesor, rocas silicatadas
- Se extiende desde la base de la corteza(Moho) hasta el núcleo externo
- Se conoce por la actividad volcánica
- Se comporta como un sólido elástico

Núcleo: Está compuesto fundamentalmente de hierro, con cantidades menores de níquel. La representación del núcleo es apoyada por la existencia del campo magnético terrestre.

- El **núcleo interno** es una esfera sólida de 1.216 km de radio situada en el centro de la Tierra. Está compuesto por una aleación de hierro y níquel.
- El **núcleo externo** de la tierra es una capa líquida compuesta por hierro y níquel situada entre el manto y el núcleo interno.

Se puede resumir las siguientes características del **núcleo**:

- Radio de 3648 Km
- La presión en el centro es mayor
- Su temperatura es mayor a los 6700°C
- Su densidad es de 11 *g/cm³*

1.3.2 Resistencia de propagación de los terrenos

Las características del suelo determinan el diseño y construcción física de un sistema de puesta a tierra necesario para lograr una resistencia determinada. Esto incluye la selección de los tipos de electrodos (normalmente múltiples), el espaciamiento de los electrodos y la colocación de los mismos.

Para el diseño de un sistema de puesta a tierra la característica fundamental de análisis es la resistividad del suelo. Debido a que el análisis de la resistividad del terreno, establece la resistencia que posee el mismo contra la circulación de corriente que se pretenden hacer fluir por el terreno.

Los factores que influyen notablemente en la resistividad del terreno, son su contenido de humedad, los metales que conforman al terreno, cambios ambientales de temperatura.

Se requiere el valor de conductividad (γ) del terreno o de la resistividad (ρ), estos valores son variables es decir es una función de la geología. Para encontrar la conductividad de los terrenos se suponen que estos son homogéneos, existen algunos valores característicos de la resistividad de los terrenos pero, estas se completan con mediciones de campo.

La resistividad en los materiales naturales varía desde $10^{-8} \Omega \cdot m$ en los metales nativos hasta $10^{15} \Omega \cdot m$ en micas. [6]

Los valores de la resistividad en una roca están determinados más que por su composición mineralógica, por el agua que contienen, fundamentalmente por la porosidad y por la salinidad del agua (mayor salinidad implica mayor conductividad).

Todo esto hace que la resistividad de cada tipo de roca presente una gran variabilidad. En general, en el campo encontraremos valores de este orden:

- Rocas ígneas y metamórficas inalteradas $> 1000 \Omega \cdot m$
- Rocas ígneas y metamórficas alteradas 100 a $1000 \Omega \cdot m$
- Calizas y areniscas 100 a más de $1000 \Omega \cdot m$
- Arcillas 1 a $10 \Omega \cdot m$
- Limos 10 a $100 \Omega \cdot m$
- Arenas 100 a $1000 \Omega \cdot m$
- Gravas 200 a más de $1000 \Omega \cdot m$

1.4 Resistividad del terreno

Se define a la resistividad del terreno, como la resistencia eléctrica que este presenta ante la circulación de una corriente ya sea esta continuo de alterna. Su unidad está dada normalmente en $\Omega \cdot m$, la cual hace referencia a la medida de la resistencia entre las caras opuestas de un metro cúbico de suelo como se aprecia en la **Figura. 1.4.** [11]

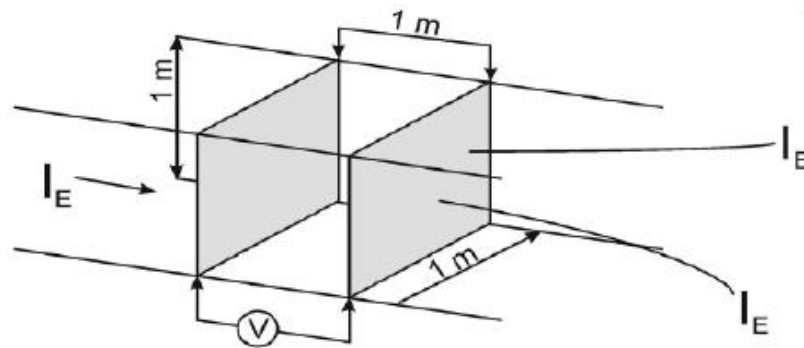


Figura.1.4. Diagrama que ilustra el concepto físico de la resistividad ρ .

Teóricamente, la resistencia del terreno de cualquier sistema de tierra o electrodo, R , puede ser calculado usando la fórmula general de resistencia:

$$R = \rho \left(\frac{L}{A} \right) \quad (1)$$

Donde:

ρ = Resistividad de la tierra (ohm-metro)

L = Longitud del trayecto del conductor (metros)

A = Área transversal del trayecto (metros cuadrados)

Es imprescindible medir la resistividad del terreno como parte del proceso de diseño. La resistividad puede variar ampliamente en diferentes medios del terreno. En general, la resistencia total que presenta una instalación de puesta a tierra está constituida por la suma de las siguientes partes:

- La resistencia del conductor (línea de tierra y línea de enlace con el electrodo) que conecta el electrodo de tierra al sistema que debe ponerse a tierra,
- La resistencia de contacto entre la superficie del electrodo y el terreno,
- La resistencia del suelo en el que está enterrado el electrodo.

La resistencia del conductor se puede determinar mediante la ecuación (1), conociendo las características de resistividad que posee el conductor utilizado. La de contacto con el terreno es despreciable por su escaso valor, y la parte más significativa es la correspondiente al terreno que rodea al electrodo.

A este respecto, debe señalarse la escasa importancia de la baja resistividad de los materiales utilizados como electrodos frente a la que posee el terreno [1]. En efecto, si se trata de cobre, presenta una resistividad de:

$$\begin{aligned}\rho_{Cu(20^{\circ})} &= \frac{1}{58} \left(\frac{\Omega mm^2}{m} \right) \\ &= \frac{1}{58} * \frac{\Omega mm^2}{m} * \frac{1 m^2}{10^6 mm^2} = \frac{1}{58 * 10^6} \left(\frac{\Omega m^2}{m} \right)\end{aligned}\quad (1.2)$$

Mientras que para un terreno excelente (menor resistividad), en circunstancias favorables, rara vez podrá alcanzarse una ρ del terreno = $1 \Omega.m^2/m$ es decir que, en el mejor de los casos, posee una resistividad 58 millones de veces mayor que la del cobre, circunstancia no tenida en cuenta y por cuya razón poco importa, desde el punto de vista de la resistividad, el metal utilizado como electrodo.

1.4.1 Efectos de la humedad, temperatura y la sal en la resistividad

La mayoría de los suelos naturalmente contienen cantidades variables de electrolitos que conducen la electricidad. Como un resultado, la adición de humedad mejorará sus propiedades conductivas; cuanto mayor humedad contenga en el suelo, la resistividad será más baja. Sin embargo, la adición de humedad en suelos que incluyen granito, arenisca, y piedra caliza en la superficie tendrá poco o ningún efecto en la reducción de la resistividad.

La temperatura, como también la humedad, puede tener un impacto significativo en la resistividad. La resistividad en función con la temperatura no varía mucho, se puede observar un cambio notable, cuando la temperatura alcanza las condiciones de congelamiento, por tal motivo la humedad en el terreno se congela por ende se incrementa la resistividad.

La cantidad de sal en la tierra también influye a la resistividad del suelo. En general cuanto más sal o electrolitos contenga ese suelo, la resistividad será más baja. Sin embargo agregar sal al pozo de aterramiento puede contaminar pozos de agua potable.

1.4.2 Factores principales que influyen en la resistividad del terreno

Los factores que influyen directamente en la resistividad del terreno son las sales solubles y la humedad; la resistividad del terreno disminuye rápidamente en presencia de sales solubles y de la humedad.

La composición del terreno está formado por componentes o partes de distinta naturaleza, incluso en un lugar determinado, por lo que se presentan capas, bolsas, depósitos, etc. Las zonas en que se instalan las tomas de tierra pueden o no ser uniformes, es decir, pueden o no estar formadas, por componentes de o partes de la misma naturaleza, y además éstas están afectadas fuertemente por los cambios climáticos, lluvias y heladas.

Todo ello hace que la resistividad sea muy variable de un lugar a otro y pueda resumirse en que la modifican, de manera muy notable, los siguientes factores del terreno:

La composición; la estratigrafía; las sales solubles y su concentración; el estado higrométrico; la temperatura; la granulometría y la compacidad. [6]

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE LA NORMA IEEE Std 80 - 2000

El procedimiento de diseño que se describe corresponde a la Standard 80-2000 de la IEEE [12] y permite obtener niveles seguros de tensiones de paso y de toque dentro de la subestación (área cercada) y en sus proximidades. Puesto que la tensión de malla representa la peor tensión de toque posible dentro de la subestación (excluyendo los potenciales transferidos), esta clase de tensión se usará como base para el diseño.

Las tensiones de paso son menos peligrosas que las tensiones de malla debido a que se debe instalar una capa superficial de alta resistividad, pero esta capa no se extiende por fuera de la subestación, donde las tensiones de paso pueden ser peligrosas. En cualquier caso, las tensiones de paso y de toque calculadas deben ser menores que las tensiones de paso y de toque tolerables por el cuerpo humano.

2.1 Expresiones y criterios fundamentales

A continuación se presenta una descripción de los criterios de diseño de sistemas de puesta a tierra (SPT) con el algoritmo propuesto en IEEE 80 del 2000 [1] [12]. Un sistema de puesta a tierra debe instalarse para limitar los gradientes de potencial de tierra a niveles de tensión y corriente que no pongan en peligro la seguridad de las personas y de los equipos bajo condiciones normales y de falla.

Los siguientes parámetros, que dependen del sitio de la subestación, tienen un sustancial impacto en el diseño de la malla de puesta a tierra:

2.1.1 Corriente máxima a disipar por la malla (IG)

El valor máximo de diseño de la corriente de falla a tierra que fluye a través de la malla de la sub estación hasta la tierra circundante está dado por:

$$I_G = I_F * D_f * S_f * C_p \quad (2.1)$$

Donde:

$I_F = 3I_0 \rightarrow$ Corriente simétrica de falla a tierra A.

$D_f \rightarrow$ Factor de decremento para tener en cuenta la componente DC.

$S_f \rightarrow$ Factor de división de corriente.

$C_p \rightarrow$ Factor de crecimiento futuro de la sub estación, considera el incremento futuro de la corriente de falla.

2.1.2 Corriente simétrica de falla a tierra (IF)

Por razones prácticas, se recomienda hallar los siguientes tipos de falla:

Falla línea-línea-tierra, ignorando la resistencia de la falla y la resistencia de puesta a tierra de la subestación:

$$(I_F)_{L-L-T} = 3 * I_0 = \frac{3 * E * Z_2}{Z_1 * (Z_0 + Z_2) + Z_2 * Z_0} \quad (2.2)$$

Falla línea-tierra, ignorando la resistencia de la falla y la resistencia de puesta a tierra de la sub estación:

$$(I_F)_{L-T} = 3 * I_0 = \frac{3 * E}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (2.3)$$

Donde:

$I_0 \rightarrow$ Valor RMS de secuencia cero de la corriente simétrica de falla en A.

$E \rightarrow$ Tensión de fase –neutro RMS en V.

$Z_1 \rightarrow$ Impedancia equivalente de secuencia (+) del sistema en el punto de falla.

$Z_2 \rightarrow$ Impedancia equivalente de secuencia (-) del sistema en el punto de falla.

$Z_0 \rightarrow$ Impedancia equivalente de secuencia (0) del sistema en el punto de falla.

En una ubicación dada, una falla simple línea – tierra será la peor si

$Z_1 * Z_0 > (Z_2)^2$ de la falla y una falla línea-línea-tierra será la peor si $Z_1 * Z_0 < (Z_2)^2$,
es común que en un sistema dado $Z_1 = Z_2$

2.1.3 Factor de decremento (Df)

En el diseño de la malla a tierra, se debe considerar la corriente asimétrica de falla, la cual resulta de multiplicar la corriente simétrica de falla por el factor de decremento, que a su vez está dado por:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f}} \left(1 - e^{-\frac{2 * t_f}{T_a}} \right) \quad (2.4)$$

Donde:

$t_f \rightarrow$ Duración de la falla en s

$T_a \rightarrow$ Constante de tiempo de la componente DC.

$$T_a = \frac{X}{\omega R} = \frac{X}{R} * \frac{1}{2\pi f} \quad (2.5)$$

$X, R \rightarrow$ Componentes de la impedancia sub transitoria de falla que se usan para determinar la relación X / R .

2.1.4 Factor de crecimiento (Cp)

Si la malla de puesta a tierra se construye teniendo en cuenta la capacidad total de la subestación, y no se consideran aumentos futuros de carga ni de alimentadores, $C_p=1$. [13]

2.1.5 Factor de división de corriente (Sf)

El proceso del cálculo consiste en derivar una representación equivalente de los cables de guarda, neutros, etc. Esto es, conectarlos a la malla en la subestación y luego resolver el equivalente para determinar qué fracción de la corriente total de falla fluye entre la malla y la tierra circundante, y qué fracción fluye a través de los cables de guarda o neutros, hacia las tierras de los pie de torres que entran y sacan líneas de la subestación. Sf depende de:

- Localización de la falla.
- Magnitud de la resistencia de la malla de puesta a tierra de la subestación.
- Cables y tubos enterrados en las vecindades de la subestación o directamente conectados al sistema de puesta a tierra.

- Cables de guarda, neutros u otras trayectorias de retorno por tierra.
- Líneas de transmisión que entran y alimentadores que salen de la subestación; cantidad, número de cables de guarda y la impedancia de cada uno; cantidad y resistencia de puestas a tierra de pies de torre; longitud de líneas de transmisión y alimentadores; material y calibre de cables de guarda y neutros. [13]

Existe una serie de desarrollos matemáticos, curvas y tablas que permiten encontrar el valor de S_f pero resulta mucho más práctico utilizar la *Tabla 2.1*.

La **Tabla 2.1** muestra las impedancias equivalentes de cables de guarda de líneas de transmisión y de neutros de alimentadores de distribución, para una contribución remota del 100% con X líneas de transmisión y alimentadores de distribución [1] [13]. La primera columna muestra las impedancias equivalentes para resistencias de electrodos de puesta a tierra de líneas de transmisión R_{tg} de 15Ω y resistencias de electrodos de puesta a tierra de alimentadores de distribución R_{dg} de 25Ω . La segunda columna de impedancias equivalentes corresponde a $R_{tg}=100\Omega$ y $R_{dg}=200\Omega$. [13]

El factor de división de corriente será entonces:

$$(S_f)_{X/Y} = \left| \frac{(Z_{eq})_{X/Y}}{R_g + (Z_{eq})_{X/Y}} \right| \quad (2.6)$$

Donde:

$(Z_{eq})_{X/Y} \rightarrow$ Impedancia equivalente de X cables de guarda de cables de líneas de transmisión e Y neutros de alimentadores de distribución.

$R_g \rightarrow$ Resistencia del sistema de puesta a tierra de la subestación.

Tabla 2.1. Impedancias equivalentes aproximadas de cables de guarda de transmisión y neutros de distribución (alimentadores).

Número de líneas de transmisión	Número de neutros de distribución	Zeq (ohms) Rtg =15, Rdg =25	Zeq (ohms) Rtg =100, Rdg =200
1	1	0,91 + J0,485	3,27 + J0,652
1	2	0,54 + J0,33	2,18 + J0,412
1	4	0,295 + J 0,20	1,32 + J0,244
1	8	0,15 + J 0,11	0,732 + J0,133
1	12	0,10 + J 0,076	0,507 + J0,091
1	16	0,079 + J 0,057	0,387 + J0,069
2	1	0,685 + J 0,302	2,18 + J0,442
2	2	0,455 + J 0,241	1,63 + J0,324
2	4	0,27 + J 0,165	1,09 + J0,208
2	8	0,15 + J 0,10	0,685 + J0,122
2	12	0,10 + J 0,07	0,47 + J0,087
2	16	0,08 + J 0,055	0,366 + J0,067
4	1	0,45 + J 0,16	1,30 + J0,273
4	2	0,34 + J 0,15	1,09 + J0,22
4	4	0,23 + J 0,12	0,817 + J0,16
4	8	0,134 + J 0,083	0,546 + J0,103
4	12	0,095 + J 0,061	0,41 + J0,077
4	16	0,073 + J 0,05	0,329 + J0,06
8	1	0,27 + J 0,08	0,72 + J0,152
8	2	0,23+ J 0,08	0,65 + J0,134
8	4	0,17 + J 0,076	0,543 + J0,11
8	8	0,114 + J 0,061	0,408 + J0,079
8	12	0,085 + J 0,049	0,327 + J0,064
8	16	0,067 + J0,041	0,273 + J0,052

2.1.6 Duración de la falla (t_f) y duración del choque (t_s)

La duración de la falla y la duración del choque normalmente se asumen iguales, a menos que la duración de la falla sea la suma de choques sucesivos, como los producidos por los re-cierres automáticos de los reclosers. La selección de t_f puede reflejar tiempos de despeje rápidos de la subestación de transmisión y tiempos de despeje lento para subestaciones de distribución e industrial. La selección de t_f y t_s puede resultar en la combinación más pesimista de factores de

decremento de corrientes de falla y corrientes permitidas por el cuerpo humano.

Valores típicos para t_f y t_s están en el rango de 0.25 s a 1 s.

2.1.7 Geometría de la malla

Las limitaciones de los parámetros físicos de una malla de puesta a tierra están basadas en las restricciones físicas y económicas de la misma. Es poco práctico instalar una placa de cobre como sistema de puesta a tierra.

- Los espacios típicos entre conductores (D) están en el rango:

$$15\text{m} > D > 3\text{m}$$

- Las profundidades típicas (h) están en el rango:

$$1.5\text{m} > h \geq 0.5\text{m}$$

- Los calibres típicos de conductores (ACM) están en el rango:

$$500\text{MCM} > A_{CM} \geq 2/0 \text{ AWG}$$

El diámetro del conductor de la malla tiene un efecto despreciable sobre la tensión de la malla.

El área del sistema de puesta a tierra (A) es el factor más importante en la determinación de la resistencia de la malla (Rg). Entre mayor sea A, menor será Rg y por lo tanto, es menor la elevación del potencial de tierra (GPR). [12]

2.1.8 Resistividad de la capa superficial (ρ_s)

Una capa de alta resistividad sobre la superficie ayuda a limitar la corriente que pasaría por el cuerpo humano, ya que esta capa agrega una resistencia a la resistencia promedio del cuerpo.

Una capa superficial con un espesor (h_s) entre $0.15 \text{ m} \geq h_s \geq 0.1 \text{ m}$ de un material de alta resistividad como la grava o la roca volcánica triturada, colocada sobre la superficie más arriba de la malla, incrementa la resistencia de contacto entre el

suelo y los pies de las personas en la subestación y la corriente por el cuerpo bajará considerablemente. La reducción depende de los valores relativos de las resistividades del suelo en contacto con la malla, y del espesor y material de la capa superficial.

La capa superficial también es útil para retardar la evaporación de la humedad, y así limitar el secado de las capas superiores durante los períodos de verano. Esta capa tiene una resistividad del orden de $5000 \Omega\text{-m} > \rho_s > 2000 \Omega\text{-m}$. Una capa con un espesor entre 0.1m y 0.15m, disminuye el factor de riesgo (relación entre la corriente del cuerpo y la corriente de cortocircuito) a una relación 10:1 comparado con la humedad natural de la tierra.

Se introduce aquí el factor de disminución de la capa superficial (C_s), que puede ser considerado como un factor de corrección para calcular la resistencia efectiva del pie de una persona en presencia de un material superficial de espesor finito. La norma expone un procedimiento matemático y presenta unas gráficas para encontrar el valor de (C_s); sin embargo, también presenta una expresión empírica para el valor de (C_s), este valor está dentro del 5% de los valores obtenidos con un método más analítico:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09} \quad (2.7)$$

Donde:

$C_s \rightarrow$ Factor de disminución de la capa superficial.

$\rho \rightarrow$ Resistividad del terreno ($\Omega\text{-m}$).

$\rho_s \rightarrow$ Resistividad de la capa superficial ($\Omega\text{-m}$).

$h_s \rightarrow$ Espesor de la capa superficial.

La norma también define el factor de reflexión entre las resistividades de materiales diferentes como:

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (2.8)$$

2.1.9 Resistividad del terreno (ρ)

La resistencia de la malla y los gradientes de tensión dentro de una subestación están directamente relacionados con la resistividad del terreno, lo cual variará horizontal y verticalmente. Se deben reunir suficientes datos relacionados con el patio de la subestación, con base en mediciones directas de resistividad empleando un telurómetro. La resistividad del terreno es directamente afectada por la humedad, la temperatura ambiente y el contenido de químicos.

2.1.10 Investigación de la estructura del suelo

Las investigaciones sobre resistividad del terreno de una subestación son esenciales para determinar la composición general del suelo y el grado de homogeneidad. Las pruebas de las muestras de excavaciones, perforaciones y otras investigaciones geológicas, proporcionan información útil sobre la presencia de varias capas y la naturaleza del suelo, y dan una idea sobre el rango de resistividad del terreno del sitio. La **Tabla 2.2** muestra el rango de resistividades de suelos típicos. [\[1\]](#) [\[13\]](#)

Tabla 2.2. Rango de resistividad del suelo.

Tipo de Suelo	Rango de Resistividad ($\Omega - m$)
Lama	5-1400
Humus	10-150
Limo	20-100
Arcillas	80-330
Tierra de jardín	140-480
Caliza Fisurada	500-1000
Caliza compacta	1000-5000
Granito	1500-10000
Arena común	3000-9000
Basalto	10000-20000

2.1.11 Medidas de resistividad

Los estimativos basados en la clasificación del suelo ofrecen sólo una aproximación de la resistividad; por tanto, las pruebas reales son imperativas. Éstas deben hacerse en muchos lugares dentro del área de la subestación. Rara vez se encuentran sitios de la subestación donde la resistividad sea uniforme en toda el área completa y a profundidades considerables. Típicamente existen varias capas y cada una tiene una resistividad diferente. Con frecuencia ocurren cambios laterales, y en comparación con los verticales esos cambios son más grandes. Las pruebas de resistividad del suelo deben hacerse para determinar si existen variaciones importantes de la resistividad con la profundidad.

El número de medidas tomadas debe ser más grande donde las variaciones son mayores, especialmente si algunas lecturas son tan altas como para sugerir un posible problema de seguridad. Si la resistividad varía apreciablemente con la

profundidad, es deseable usar un rango incrementado de espaciamientos de prueba para obtener un estimativo de la resistividad de capas más profundas.

El método de Wenner o de los cuatro electrodos, mostrado en la **Figura. 2.1**, es la técnica más comúnmente usada: [13]

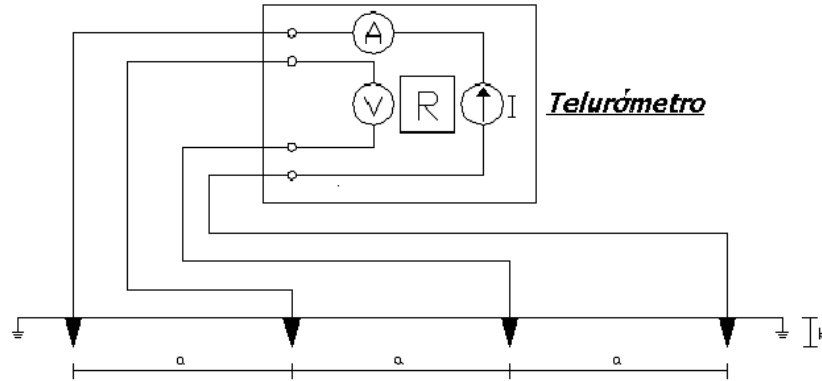


Figura. 2.1. Método de los cuatro electrodos o de Wenner.

Los cuatro electrodos son clavados en la tierra en línea recta a una profundidad “b”, separados a una distancia “a”. La tensión entre los dos terminales interiores (o de potencial) es luego medido y dividido por la corriente entre los dos terminales exteriores (o de corriente) para dar el valor de la resistencia R, que aparece indicada en el telurómetro. Luego se aplica la siguiente fórmula:

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (2.9)$$

Donde:

$\rho_a \rightarrow$ Resistividad aparente del suelo ($\Omega\text{-m}$).

$R \rightarrow$ Resistencia medida en Ω .

$a \rightarrow$ Distancia entre electrodos adyacentes en m.

$b \rightarrow$ Profundidad de los electrodos en m.

Si $b \ll a$ como es el caso más común:

$$\rho_a = 2\pi a R \quad (2.10)$$

Las ecuaciones anteriores se pueden usar para determinar la resistividad aparente

ρ_a a una profundidad a .

2.1.12 Interpretación de las medidas de resistividad del suelo

El objetivo fundamental de las mediciones es encontrar un modelo de suelo que ofrezca una buena aproximación del suelo real. La resistividad varía lateralmente y con respecto a la profundidad, dependiendo de la estratificación del terreno. Las condiciones climáticas influyen en la resistividad medida, razón por la cual, dichas mediciones deben realizarse, en lo posible, en época de verano prolongado para obtener la resistividad más alta y desfavorable.

Los modelos más comúnmente usados para la resistividad del suelo son:

Modelo de suelo uniforme:

Usado sólo cuando existe una variación moderada de la resistividad aparente. En condiciones de suelo homogéneo, que raramente ocurren en la práctica, el modelo de suelo uniforme puede ser razonablemente exacto.

Cuando el contraste entre las diferentes resistividades de las capas es moderado, se puede usar un valor promedio para la resistividad del suelo, como una primera aproximación o para establecer el orden de magnitudes. La resistividad aproximada para un suelo uniforme se puede obtener tomando un promedio aritmético de las resistividades aparentes medidas en varios sitios y direcciones dentro del patio, así:

$$\rho_{aprom} = \frac{\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an}}{n} \quad (2.11)$$

Donde:

$\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an} \rightarrow$ Resistividades aparentes medidas a diferentes espaciamientos siguiendo el método de Wenner.

$n \rightarrow$ Número total de medidas tomadas.

Pero la mayoría de los suelos no reúnen este criterio, ya que en la práctica la resistividad de los suelos varía significativamente.

En lugar del promedio aritmético, también puede emplearse la distribución normal para obtener la resistividad aparente del suelo. Como guía general, un suelo puede ser considerado como uniforme si la diferencia entre los dos valores extremos de las resistividades medidas es menor del 30%. [13]

Modelo de suelo de dos capas:

Es una representación muy exacta de las condiciones reales del suelo, y consiste en una capa superior de profundidad finita y con resistividad diferente a la de la capa más baja de espesor infinito.

Un modelo de suelo de dos capas puede representarse por una capa superior de profundidad finita, por encima de una capa inferior de profundidad infinita. El cambio abrupto de la resistividad en las proximidades de cada capa de suelo puede describirse por medio del factor de reflexión K , definido como:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (2.12)$$

Donde:

$\rho_1 \rightarrow$ Resistividad de la capa superior en $(\Omega \cdot m)$

$\rho_2 \rightarrow$ Resistividad de la capa inferior en $(\Omega \cdot m)$

En muchos casos, la representación de un electrodo de tierra basado en un modelo equivalente de dos capas es suficiente para diseñar un sistema seguro de puesta a tierra. Un modelo de suelo de dos capas puede aproximarse empleando el método gráfico de Sunde. La gráfica de la **Figura. 2.2** está basada en los datos de prueba de Wenner.

Los parámetros ρ_1 y ρ_2 se obtienen por inspección de las medidas de resistividad. Solamente H es obtenido por el método de Sunde [1], como sigue:

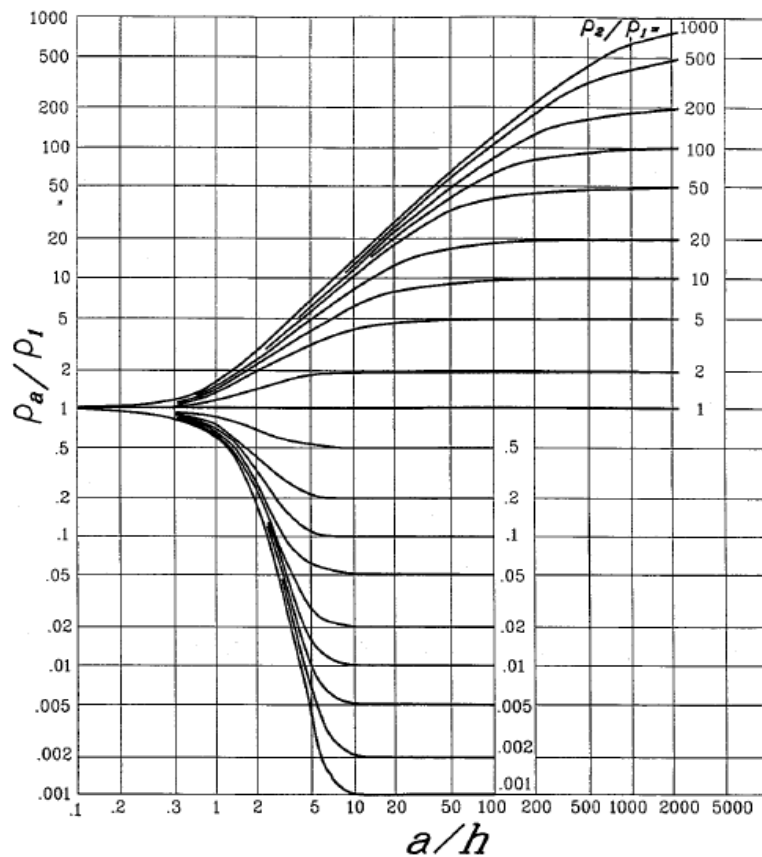


Figura. 2.2. Método gráfico de Sunde.

- De la gráfica anterior se estiman ρ_1 y ρ_2 , extendiendo el gráfico en ambos extremos para obtener los valores de resistividad, si los datos de campo son insuficientes.

- Determinar ρ_1 / ρ_2 y seleccionar una curva del gráfico de la **Figura. 2.2**, o interpolar y dibujar una nueva curva en el gráfico.
- Seleccionar el valor de ρ_1 / ρ_2 sobre el eje Y dentro de la región pendiente de la curva ρ_1 / ρ_2 apropiada. Leer el valor correspondiente a/h sobre el eje X.
- Calcular ρ_a multiplicando el valor seleccionado ρ_1 / ρ_2 por ρ_1 .
- Leer el espaciamiento de prueba correspondiente de la gráfica de ρ_a vs a.
- Calcular la profundidad del nivel superior H usando la separación de prueba apropiada a.

Modelo de suelo multicapa:

Usado cuando la condiciones del suelo son más complejas. Se pueden encontrar condiciones de suelo altamente no uniforme, que requieren el uso de técnicas de modelación multicapas, cuando un modelo de suelo de dos capas no es factible. Un modelo multicapa puede incluir varias capas horizontales o varias capas verticales. Las técnicas para interpretar resistividades de suelo altamente no uniforme requieren el uso del método de los elementos finitos.

2.1.13 Selección del tamaño del conductor

La elevación de temperatura de corto tiempo en un conductor de tierra, o el tamaño requerido del conductor como una función de la corriente de falla que pasa por el conductor, se encuentra mediante la ecuación:

$$A_{MCM} = I_F \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_C * \alpha_r * \rho_r} \right) * \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)}} \quad (2.13)$$

Donde:

$I_F \rightarrow$ Corriente asimétrica de falla RMS en KA, se usa la más elevada encontrada.

$A_{MCM} \rightarrow$ Área del conductor en MCM .

$T_m \rightarrow$ Máxima temperatura disponible o temperatura de fusión en $^{\circ}C$.

$T_a \rightarrow$ Temperatura ambiente en $^{\circ}C$.

$T_r \rightarrow$ Temperatura de referencia para los conductores del material en $^{\circ}C$.

$\alpha_0 \rightarrow$ Coeficiente térmico de resistividad a $0^{\circ}C$ en $1/^{\circ}C$.

$\alpha_r \rightarrow$ Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia T_r $1/^{\circ}C$.

$\rho_r \rightarrow$ Resistividad del conductor de tierra a temperatura de referencia T_r $\mu\Omega-cm$.

$K_0 \rightarrow 1/\alpha_0 [(1/\alpha_0) - T_r]$ en $^{\circ}C$.

$t_c \rightarrow$ Duración de la corriente en seg.

$TCAP \rightarrow$ Capacidad térmica por unidad de volumen en $J/(cm^3 \cdot ^{\circ}C)$.

La *Tabla 2.3* proporciona los datos para las constantes α_r , K_0 , T_m , ρ_r , y $TCAP$.

La fórmula simplificada de una aproximación muy buena:

$$A_{MCM} = I_F * K_f * \sqrt{t_c} \quad (2.14)$$

Donde:

$K_f \rightarrow$ Contante para el material dado en la **Tabla 2.3**, usando una $T_a = 40^{\circ}C$. [1]

El tamaño del conductor realmente seleccionado es usualmente más grande que el que se basa en la fusión, debido a factores como:

- Resistencia a los esfuerzos mecánicos esperados y la corrosión durante la vida útil de la instalación.
- Conductancia para prevenir caídas de tensión peligrosas durante una falla.
- Limitar la temperatura del conductor.

Debe aplicarse un factor de seguridad a la instalación de puesta a tierra y a los demás componentes eléctricos.

Se acostumbra entonces emplear como calibre mínimo el N° 2/0 AWG de cobre de 7 hilos, con el fin de mejorar la rigidez mecánica de la malla y soportar la corrosión.

La **Tabla 2.4** muestra la sección normalizada de conductores empleados para el sistema de puesta a tierra. [\[1\]](#) [\[5\]](#)

Tabla 2.3. Constantes de los materiales conductores.

Tipos de conductores	Conductividad (%)	Tm ^a(°C)	Kf
Cable de cobre blando	100	1083	7
Cable de cobre estirado en frio	97	250	11.78
Cable de acero revestido de cobre	40	1084	10.45
Cable de acero revestido de cobre	30	1084	12.06
Cable de aluminio	61	1084	12.12
Cable de aleación de aluminio 5005	53.5	657	12.41
Cable de aleación de aluminio 6201	52.5	652	12.47
Cable de acero revestido de aluminio	20.3	654	17.2
Cable de acero 1020	10.8	657	15.95
Varilla de acero	9.8	1510	14.72
Varilla de acero revestida de cobre	20	1400	14.64
Varilla de acero galvanizado	8.6	419	28.96
Varilla de acero inoxidable 304	2.4	1400	30.05

Tabla 2.4. Sección normalizada de conductores.

Calibre del Conductor		Área Nominal mm ²	Diámetro m
MCM	AWG		
350		177.35	0.015
300		152.01	0.0139
250		126.68	0.0127
211.6	4/0	107.22	0.0117
167.8	3/0	85.03	0.0104
133.1	2/0	67.44	0.0093

2.1.14 Criterios de tensiones de paso y toque tolerables

La seguridad de una persona depende de la prevención de cantidades críticas de energía de choque absorbidas por el cuerpo humano, antes de que la falla sea despejada y el sistema desenergizado. Los voltajes máximos durante un circuito accidental no deben exceder los siguientes límites:

Fórmula general de la tensión de paso:

$$Ep = (R_B + 2R_f) * I_B \quad (2.15)$$

Fórmula general de la tensión de Contacto:

$$Et = (R_B + \frac{R_f}{2}) * I_B \quad (2.16)$$

Tensión de paso límite tolerable por un cuerpo de **50 kg** de peso corporal:

$$Ep_{50} = (1000 + 6C_s \rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.17)$$

Tensión de toque límite tolerable por un cuerpo de **50 kg** de peso corporal:

$$Et_{50} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.18)$$

Tensión de paso límite tolerable por un cuerpo de **70 kg** de peso corporal:

$$Ep_{70} = (1000 + 6C_s\rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.19)$$

Tensión de paso límite tolerable por un cuerpo de **70 kg** de peso corporal:

$$Et_{70} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.20)$$

Donde:

$R_B = 1000\Omega \rightarrow$ Resistencia promedio del cuerpo humano.

$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \rightarrow$ Corriente tolerable en función del tiempo por el cuerpo (A).

$T_s \rightarrow$ Duración del choque (s)

$6C_s\rho_s = 2R_f \rightarrow$ Resistencia a tierra de los 2 pies separados 1m en serie sobre la capa superficial.

$1.5C_s\rho_s = \frac{R_f}{2} \rightarrow$ Resistencia a tierra de los dos pies juntos en serie sobre la capa superficial.

$R_B = \frac{\rho}{4b} \rightarrow$ Resistencia a tierra de un disco metálico de radio $b=0.08m$ sobre la superficie de una malla homogénea de resistencia ρ .

$C_s \rightarrow$ Factor de disminución de la capa superficial culada con la ecuación (2.7)

$\rho_s \rightarrow$ Resistividad del material de la capa superficial en $\Omega - m$.

Las tensiones de paso y de toque reales deben ser menores que los respectivos límites máximos permisibles (o tolerables) para obtener seguridad.

2.1.15 Evaluación del potencial de tierra (GPR)

Un buen sistema de puesta a tierra proporciona una resistencia baja a una tierra remota, con el fin de minimizar la elevación del potencial de tierra GPR, dada por:

$$GPR = I_g * R_g \quad (2.21)$$

2.2 Cálculo de las tensiones reales de la malla

2.2.1 Tensión de contacto máxima de la malla (Tcr)

La tensión máxima de la malla, es también considerada como la máxima tensión de contacto real en cualquier punto de la malla, sobre todo en la periferia de la misma. Por esta razón, la expresión se plantea de la siguiente manera:

$$E_m = \frac{\rho * I_G * K_m * K_i}{L_M} \quad (2.22)$$

Donde:

$K_m \rightarrow$ Valor geométrico de espaciamiento de la malla, calculado así:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd_c} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd_c} - \frac{h}{4d_c} \right) + \frac{K_{ii}}{k_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \quad (2.23)$$

Para mallas con varillas de tierra a lo largo del perímetro, o para mallas con varias varillas de tierra en las esquinas, así como para ambas, $K_{ii} = 1$; donde K_{ii} es un factor de corrección que ajusta los efectos de los conductores sobre la esquina de la malla.

Para mallas sin varillas de tierra, o sólo unas pocas, ninguna localizada en las esquinas o sobre el período:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}} \quad (2.24)$$

K_h Es un factor de corrección que tiene en cuenta los efectos de la profundidad de la malla, dado por:

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad \text{Con } h_0 = 1\text{m} \quad (2.25)$$

n representa el número de conductores paralelos de una malla rectangular equivalente, y está dado por:

$$n = n_a * n_b * n_c * n_d \quad (2.26)$$

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p} \quad n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \quad n_c = \left[\frac{L_x * L_y}{A} \right]^{\frac{0.7A}{L_x * L_y}} \quad n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (2.27)$$

Para mallas cuadradas: $n = n_a$ ya que $n_b = n_c = n_d = 1$

Para mallas rectangulares: $n = n_a * n_b$ ya que $n_c = n_d = 1$

Para mallas en forma de L: $n = n_a * n_b * n_c$ ya que $n_d = 1$

Donde:

$L_c \rightarrow$ Longitud total de los conductores de la malla horizontal en m.

$L_p \rightarrow$ Longitud del perímetro de la malla en m.

$L_x \rightarrow$ Longitud máxima de la malla en la dirección X, en m.

$L_y \rightarrow$ Longitud máxima de la malla en la dirección Y, en m

$D_m \rightarrow$ Distancia máxima entre dos puntos cualesquiera de la malla, en m.

K_i , es el factor de irregularidad y se define como:

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad (2.28)$$

Para mallas sin varillas de tierra o para mallas con sólo unas pocas varillas esparcidas a través de la malla pero ninguna localizada en las esquinas o a lo largo del perímetro, la longitud efectiva enterrada (L_M) es:

$$L_M = L_C + L_R \quad (2.29)$$

Donde:

$$L_R = n_r L_r \rightarrow \text{Longitud total de todas las varillas.} \quad (2.30)$$

$n_r \rightarrow$ Numero de varillas.

$L_r \rightarrow$ Longitud de cada varilla.

Para mallas con muchas varillas de tierra en las esquinas, así como a lo largo del perímetro, la longitud efectiva enterrada (L_M) es:

$$L_M = L_C + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_X^2 + L_Y^2}} \right) \right] L_R \quad (2.31)$$

2.2.2 Tensión de paso máxima de la malla (Tpr)

El valor de tensión real de paso se calcula mediante:

$$E_P = \frac{\rho * I_G * K_S * K_i}{L_s} \quad (2.32)$$

Para mallas con o sin varillas de tierra, la longitud efectiva del conductor enterrado L_s es:

$$L_s = 0.75L_C + 0.85L_R \quad (2.33)$$

Se asume que el EP máximo ocurre sobre una distancia de un metro hacia fuera del conductor perimetral en el ángulo que biseca la esquina más extrema de la malla.

El valor de K_s se calcula si:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (2.34)$$

Esta ecuación es válida para profundidades de enterramiento de $0.25\text{m} < h < 2.5\text{m}$.

2.3 Cálculo de la resistencia de puesta a tierra

La principal función de las puestas a tierra es garantizar la seguridad de las personas. Esta es una consideración muy importante durante el diseño y obliga a que se fije una resistencia objetivo. Por lo tanto, los valores recomendados en la **Tabla 2.5** surgen de la experiencia, sin que necesariamente obedezcan a una norma específica. [\[1\]](#) [\[4\]](#) [\[14\]](#)

Tabla 2.5. Valores máximos recomendados de sistemas de puesta a tierra.

Utilizada Para	Rg Máxima en Ohm
Estructura de líneas de transmisión	20
Subestaciones de alta y extra alta tensión $V \geq 115\text{KV}$	1
Subestaciones de media tensión de uso exterior en poste	10
Subestaciones de media tensión de uso interior	10
Protección contra Rayos	4
Neutro de acometida en baja tensión	25
Descargas electrostáticas	25
Equipos electrónicos sensibles	5

2.3.1 Cálculos simplificados

Una vía rápida de obtener la resistencia de un sistema de puesta a tierra, es mediante la expresión que fue formulada por Sverak como:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (2.35)$$

Donde:

$L_T \rightarrow$ Longitud total de conductores enterrados en m.

$\rho \rightarrow$ Resistividad del terreno $\Omega\text{-m}$.

$A \rightarrow$ Área ocupada por la malla de tierra m^2

$H \rightarrow$ Profundidad de la malla en m.

Para mallas sin varillas de tierra, esta fórmula ha sido probada y da resultados que son prácticamente idénticos a los obtenidos con la fórmula de Schwarz.

2.3.2 Cálculos en terrenos homogéneos

Schwarz desarrolló el siguiente conjunto de ecuaciones para determinar la resistencia de un sistema de puesta a tierra en un suelo homogéneo que consta de una malla horizontal con electrodos verticales (varillas). Schwarz empleó la siguiente ecuación para cambiar la resistencia de la malla, varillas y la resistencia mutua, para calcular la resistencia de puesta a tierra R_g : [15] [1]

$$R_g = \frac{R_c \cdot R_b - R_m^2}{R_c + R_b - 2 \cdot R_m} \quad (2.36)$$

Donde:

R_c - Resistencia de tierra de los conductores de la malla en Ω .

R_b -Resistencia de tierra de todas las varillas de tierra en Ω .

R_m -Resistencia mutua entre el grupo de conductores de la malla R_c y el grupo de varillas de tierra R_b en Ω .

Cuyas variables están dada por:

$$R_c = \frac{\rho}{\pi \cdot L} \left(\ln \frac{2 \cdot L}{\sqrt{t \cdot d_c}} + \frac{k_1 \cdot L}{\sqrt{A \cdot B}} - k_2 \right) \quad (2.37)$$

$$R_b = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot N \cdot l} \left(\ln \left(\frac{2 \cdot l}{d_b} \sqrt{\frac{3 \cdot l + 4 \cdot t}{l + 4 \cdot t}} \right) + \frac{2 \cdot k_1 \cdot l}{\sqrt{A \cdot B}} (\sqrt{N} - 1)^2 \right) \quad (2.38)$$

$$R_m = R_c - \frac{\rho}{\rho \cdot L} \left(\ln \frac{l}{\sqrt{t \cdot d_c}} - 1 \right) \quad (2.39)$$

Donde:

$$k_1 \approx 1.43 - \frac{2.3 \cdot t}{\sqrt{A \cdot B}} - 0.044 \frac{A}{B} \quad (2.40)$$

$$k_2 \approx 5.5 - \frac{8 \cdot t}{\sqrt{A \cdot B}} + \left(0.15 - \frac{t}{\sqrt{A \cdot B}} \right) \frac{A}{B} \quad (2.41)$$

$\rho \rightarrow$ Resistividad del terreno en $\Omega - m$.

$L \rightarrow$ Longitud total de todos los conductores de la malla en m.

$t \rightarrow$ Profundidad de los conductores de la malla en m.

$d_c \rightarrow$ Diámetro del conductor de la malla en m.

$A \rightarrow$ Largo, lado mayor de la malla en m.

$B \rightarrow$ Ancho, lado menor de la malla en m.

$N \rightarrow$ Número de varillas de tierra.

$l \rightarrow$ Longitud de cada varilla en m.

$d_b \rightarrow$ Diámetro de las varilla en m.

$k_1, k_2 \rightarrow$ Coeficientes empíricos.

La resistencia combinada de R_c y R_b será menor que la resistencia a tierra, analizando ambos componentes por sí solos; pero será más alta que la de la combinación en paralelo ($R_m < R_c, R_m < R_b, R_g > R_m$). [\[12\]](#)

2.3.3 Cálculo en terrenos de dos capas

En la práctica, es deseable enterrar varillas de tierra profundas para alcanzar suelos de menor resistividad. Como son precisamente las varillas verticales las

que alcanzan la capa inferior, solo se ha modificado la expresión de la resistencia del conjunto de varillas, usando la expresión de R_c , R_m y posteriormente R_g como se expuso en el subepígrafe anterior **(2.4.2)**.

$$R_b = \frac{\rho a}{2 \cdot \pi \cdot N \cdot l} \left(L_n \left(\frac{2 \cdot l}{d_b} \sqrt{\frac{3 \cdot l + 4 \cdot t}{l + 4 \cdot t}} \right) + \frac{2 \cdot k_1 \cdot l}{\sqrt{A \cdot B}} (\sqrt{N} - 1)^2 \right) \quad (2.42)$$

Donde:

$$\rho_a = \frac{L_r \cdot \rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_2 (H - h) + \rho_1 (L_r + h - H)} \quad (2.43)$$

$\rho_1 \rightarrow$ Resistividad de la capa superior en $\Omega - m$.

$\rho_2 \rightarrow$ Resistividad de la capa profunda en $\Omega - m$.

$H \rightarrow$ Espesor de la capa superior en m.

$h \rightarrow$ Profundidad de la malla en m.

$L_r \rightarrow$ Longitud de las varillas (c/u).

$\rho_a \rightarrow$ Resistividad aparente en Ω -m

Si $\rho_2 \leq 0.2\rho_1$ y $H \geq 0.1L_x$, las anteriores ecuaciones son razonablemente exactas para la mayor parte de los cálculos prácticos.

2.4 Tratamiento del suelo para obtener resistividad más baja

Con frecuencia, es imposible obtener la reducción deseada de resistencia de tierra agregando más conductores o más varillas de tierra a la malla. Una solución alternativa es incrementar de manera efectiva el diámetro de los electrodos, modificando el suelo alrededor del electrodo. Los métodos más conocidos son los siguientes: [11] [14]

- El uso de bentonita, una arcilla natural que contiene montmorillonita, que se formó por acción volcánica hace mucho tiempo, y es un elemento no corrosivo, estable y tiene una resistividad de $2.5 \Omega\text{-m}$ al 300% de humedad. Es de naturaleza higroscópica.
- El uso de sales como cloruro de sodio, magnesio y sulfatos de cobre, o cloruro de calcio, para incrementar la conductividad del suelo alrededor del electrodo. Pero estas sales emigran a otras áreas.
- El uso de electrodos de tipo químico que constan de un tubo de cobre relleno de una sal. Los agujeros en el tubo permiten la entrada de humedad, disolver las sales y permitir que la solución de sal se filtre en la tierra.
- Materiales artificiales de tierra, de baja resistividad colocados alrededor de las varillas y de los conductores en la zanja. En Colombia se conocen como Hidrosolta y Fabigel.
- Electrodos revestidos de concreto, donde el concreto por ser un material higroscópico y que atrae la humedad, al ser enterrado en el suelo se comporta como un semiconductor mediano con resistividades de 30 a $90 \Omega\text{-m}$, pero facilita la corrosión.

2.5 Consideraciones para diseñar la malla

2.5.1 Refinamiento del diseño preliminar

Si los cálculos basados en el diseño preliminar, como se puede observar en la **Figura. 2.3**, indican que pueden existir diferencias de potencial peligrosas dentro de la subestación, se deben estudiar diferentes alternativas de selección y aplicarlas donde sea adecuado. [1]

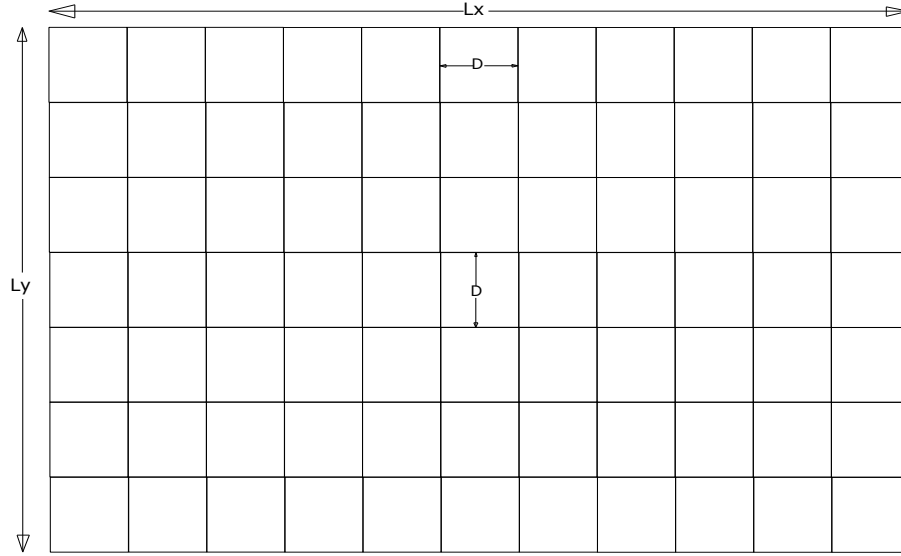


Figura. 2.3. Diseño de una malla.

$$L_C = NL_X + ML_Y \quad (2.44)$$

$$A = L_X * L_Y \quad (2.45)$$

Donde:

$N \rightarrow$ Número de conductores de longitud L_X .

$M \rightarrow$ Número de conductores de longitud L_Y .

Posibles remedios o alternativas de solución:

- **Disminuir la resistencia total de la malla (R_g):**

Al disminuir R_g se disminuye el GPR y por lo tanto el voltaje máximo transferido. Esto se puede lograr aumentando el área total de la malla (A), enterrando varillas de puesta a tierra, que penetren en capas de más baja resistividad.

- **Ajustar o reducir los espaciamientos de los conductores de la malla (D):**

Además de disminuir el espaciamiento D (lo cual aumenta la cantidad de conductor a enterrar) también se puede pensar en extender el conductor de la malla por fuera de la cerca, incrementar la cantidad de varillas perimetrales, enterrar dos o más conductores paralelos a lo largo del perímetro, aumentar la profundidad de la malla y disminuir el espaciamiento cerca al perímetro de la malla.

- **Derivar una porción más grande de la corriente de falla hacia otras trayectorias:**

Esto se puede lograr disminuyendo la resistencia de puesta a tierra de las torres vecinas a la subestación. Esto también significa trasladar el problema a las torres de transmisión y distribución, donde no hay control de acceso.

- **Limitando la corriente total de falla.**

- **Colocando barreras para limitar el acceso a algunas áreas.**

- **Instalando mallas equipotenciales:**

Hacerlo debajo de la capa de roca triturada y en los sitios donde las cuadrillas se ubican con más frecuencia. Las mallas equipotenciales se conectan a la malla principal y a la estructura metálica del equipo que está justo encima de ella (seccionadores, interruptores, etc.). Las mallas equipotenciales se pueden construir en cable de cobre N° 6 AWG con espaciamientos de 0.6m.

2.5.2 Conexiones de la malla

Se deben emplear conductores con la capacidad adecuada de corriente y resistencia mecánica suficiente para la conexión entre: [1]

- Todos los electrodos de tierra, como mallas de puesta a tierra, varillas, pozos de tierra o donde se apliquen partes metálicas, tubos de agua o de gas, cajas para pozos de agua, etc.
- Todas las partes conductivas que pueden accidentalmente llegar a energizarse, como estructuras metálicas, armazones de máquinas, alojamientos a cabinas metálicas de equipos de interrupción convencionales o aislados a gas, tanques de transformadores, cables de guarda, etc. Igualmente, partes metálicas que pueden llegar a tener diferencias relativas de potencial con otras partes metálicas y que deben tener enlaces con la malla de tierra.
- Todas las fuentes de corriente, como pararrayos, bancos de capacitores o capacitores de acople, transformadores y, donde sea adecuado, los neutros de las máquinas y circuitos de potencia.
- Debe conectarse a la malla el acero de refuerzo de las obras civiles, rieles para movilización de transformadores, tuberías de agua potable y bandejas porta cables.
- Las ventanas, puertas, pasamanos, tableros, etc., del edificio de control también deben conectarse a tierra, lo mismo que las instalaciones de baja tensión. Cables o correas de cobre se emplean usualmente para las conexiones a tierra. Algunas veces los tanques de transformadores son usados como parte de la trayectoria de tierra de los pararrayos. Así mismo, la mayor parte de las estructuras de acero y de aluminio también se usa como parte de la trayectoria a tierra, si se establece que su conductancia - incluidas las de las conexiones- es la adecuada.

Se deben también aterrizar las manijas de los seccionadores mediante una malla de seguridad bajo la capa de roca triturada, justo debajo de la manija y enlazada con la estructura metálica. También se acostumbra colocar a tierra las mallas perimetrales y la puerta de acceso mediante enlaces flexibles conectados a la cerca.

Las pantallas y forros metálicos del cableado de control se deben aterrizar en un sólo punto al igual que las bandejas y escalerillas porta cables.

2.5.3 Procedimiento para el diseño

Los pasos a ejecutar durante el diseño de mallas de puestas a tierra para una subestación son los siguientes: [1]

Paso 1: El mapa adecuado y plano de la localización general de la subestación proporciona un buen estimativo del área para la malla. Las medidas de resistividad determinan la curva de resistividad y los datos para modelar el terreno (suelo uniforme o suelo de dos capas), A , ρ .

Paso 2: Determinar el tamaño del conductor de la malla. La corriente de falla $3I_0$ debe ser la máxima esperada en el futuro y que será conducida por cualquier conductor en el sistema de puesta a tierra, y el tiempo t_C debe reflejar el tiempo de despeje máximo posible (incluyendo el respaldo). A_{MCM} , t_C , d , $3I_0$.

Paso 3: Determinar las tensiones tolerables de toque y de paso para personas con peso corporal de 50 kg. La selección de tiempo t_s está basada en el juicio del ingeniero diseñador. Et_{50} y Ep_{50} .

Paso 4: El diseño preliminar debe incluir un anillo conductor que abarque toda el área de la puesta a tierra, más los conductores adecuados de cruce, con el fin de proporcionar el acceso conveniente de las bajantes a tierra de los equipos, etc. Los estimativos iniciales del espaciamiento de conductores y la localización de las varillas de tierra deben estar basados en la corriente I_G y el área que está siendo aterrizada. D , L_C , L_T , h , L_R , n .

Paso 5: Se calcula la resistencia de puesta a tierra preliminar del sistema en suelo uniforme. Para el diseño final deben hacerse cálculos más exactos, considerando las varillas de tierra si es el caso. R_g , L_C , L_R .

Paso 6: Se determina la corriente I_G a disipar por la malla para evitar un sobredimensionamiento de la malla de puesta a tierra, considerando sólo esa

porción de la corriente total de falla $3I_0$ que fluye a través de la malla hacia una tierra remota. La corriente I_G debe reflejar el peor tipo de falla y localización, el factor de decremento y cualquier expansión futura de la subestación. I_G, t_f .

Paso 7: Si el GPR (elevación del potencial de tierra) del diseño preliminar es menor que la tensión tolerable de toque, no es necesario realizar más cálculos. Sólo se requerirá conductor adicional para proporcionar acceso a las bajantes de los equipos. $I_G R_g < Et_{50}$.

Paso 8: Si no se cumple la condición anterior, se calcula la tensión de malla y la tensión de paso para la malla con suelo uniforme $E_M E_S K_m K_S K_i K_{ii} K_h$

Paso 9: Si el voltaje de malla calculado es menor que la tensión tolerable de toque, se requiere completar el diseño. Si la tensión de malla calculada es mayor que la tensión tolerable de toque, el diseño debe ser modificado. $E_m < Et_{50}$?.

Paso 10: Si ambas tensiones calculadas de toque y de paso son menores que las tensiones tolerables, el diseño sólo necesita los refinamientos requeridos para proporcionar acceso a las bajantes de los equipos. Si no, el diseño preliminar debe ser modificado. $E_s < Ep_{50}$?.

Paso 11: Si se exceden las tensiones tolerables de toque y de paso, es necesaria la revisión del diseño de la malla. Estas revisiones pueden incluir espaciamientos de conductores más pequeños, varillas adicionales de tierra, etc.

Paso 12: Después de satisfacer los requerimientos de tensiones de paso y de toque, se pueden requerir varillas de tierra y malla adicional. Los conductores adicionales de malla se requieren si su diseño no incluye conductores cerca de los equipos a ser puestos a tierra. Se pueden requerir varillas adicionales en la base de los pararrayos, neutros de transformadores, etc. El diseño final también será revisado para eliminar peligros debido a potenciales transferidos y peligros asociados con áreas de interés especial.

2.6 Implementación del programa

Una vez concluido todo el estudio bibliográfico a cerca de las consideraciones de la norma IEEE Std 80 del 2000 y de los sistemas de puesta a tierra en forma general, se expone a continuación el procedimiento para implementar la interfaz gráfica del programa STI 1.0 (Sistemas de Tierra IEEE 80-2000). [1]

2.6.1 Características básicas del programa

El programa STI 1.0 programado según los requerimientos de la norma IEEE Std 80 del 2000, brinda al usuario una forma simple de introducir los datos para los estudios que se van a realizar por el mismo, así como un método rápido de solución y una posterior visualización de resultados tanto técnicos como gráficos. Su imagen principal como se puede apreciar en la **Figura. 2.4** está basada en el anterior programa (PAST 1.0), creado en nuestro Centro de Estudios el cual realiza cálculos y proyecciones de sistemas de puesta a tierra por un método exacto. [16]



Figura. 2.4. Interfaz principal del STI 1.0.

El programa cuenta con un sistema de menús de fácil uso para cualquier usuario con mínimo conocimiento acerca de los sistemas de puesta a tierra. Cuenta con un sistema para guardar y cargar archivos correspondientes a los estudios que el

usuario estime conveniente conservar. Se accede mediante el menú **Archivos**. [16]

En el menú **Cálculos** [16], el usuario puede elegir si desea hacer un estudio en terreno homogéneo o en uno de dos capaz establecidos por la norma, y seguidamente, el STI va mostrando una secuencia de ventanas para ir introduciendo los datos necesarios, separando los mismos de acuerdo a su clasificación (datos del terreno, datos de la corriente da falla, etc.). Cuando se terminan de introducir los valores pedidos, el programa muestra un mensaje interactivo durante el tiempo que realiza los cálculos y seguidamente de terminar la solución, muestra otro mensaje que señala al usuario que ya terminó los cálculos pedidos. Este último informa que se debe acudir al menú resultado para ver los mismos.

En el menú **Resultados** [16], el usuario puede elegir entre los resultados técnicos (que incluye resultados eléctricos y de estructura de la malla), resultados económicos o graficar configuración de electrodos para ver los resultados finales del estudio. Si desea calcular directamente una resistencia de puesta a tierra, potenciales de paso y contacto reales, así como volver a realizar un análisis económico, solo basta con editar los resultados técnicos de estructura de la malla y oprimir "OK".

En el menú **Simulador** [16], se genera un modelo de Simulink de manera automática con todos los tramos de la malla obtenida en cada estudio (se basa en los datos del último estudio terminado o en un estudio cargado con anterioridad), traducidos en bloques Pi, representante de sus parámetros eléctricos. Ya dentro del modelo el usuario puede conectar la fuente de falla o descarga atmosférica en la coordenada deseada y mediante un osciloscopio, observar el comportamiento de los potenciales Vs tiempo. Es necesario aclarar que todo lo referente al menú Simulador, es resultado de dos tesis de grado; una implementada en el 2012 y otra que se realiza de forma paralela a este trabajo. Por acuerdo del profesor principal del tema en la facultad, se decidió incluir ambas secuencias de códigos en la misma interfaz gráfica del STI 1.0.

El programa cuenta con un sistema de **Ayuda** [16] que consiste primeramente en brindar información de su autor en el menú **A cerca del STI**; también implementa una **Guía de Usuario** en la que se detalla aún más el funcionamiento del programa, incluyendo ejemplos para analizar estudios y ver los resultados obtenidos; además cuenta con una serie de **Tablas Importantes** para que el usuario vea más fácil la introducción de algunos datos a partir de las mismas

2.6.2 Secuencia lógica de los cálculos realizados

Es necesario aclarar que en primera instancia, el programa calcula un sistema de puesta a tierra a partir principalmente de una resistencia deseada por el usuario, además de brindar los resultados de potenciales reales existentes en la malla para la resistencia hallada y para la corriente de falla, cuyo dato también lo proporciona el usuario. [16] [1]

Según establece la norma, no se puede diseñar un sistema de puesta a tierra que no cumpla con los potenciales mínimos permisibles por el cuerpo humano, por esta razón el primer cálculo que realiza el programa son precisamente, los potenciales de paso y contacto permisibles.

Dado que la norma establece restricciones en cuanto a la separación máxima y mínima de los conductores horizontales, el programa establece una malla mínima inicial de conductores horizontales (cuadrada o rectangular), de manera tal que no quede más pequeña que las dimensiones del área disponible para la instalación.

El STI 1.0 calcula los potenciales reales de contacto y de paso incrementando el interior de la malla, hasta que se cumplan con los mínimos permisibles o informar al usuario para que extienda el área de instalación (de ser posible).

Una vez cumplidos los potenciales permisibles, el programa pasa de manera automática a calcular la resistencia de la malla que va creando, incrementando nuevamente la misma mientras no se cumpla con la resistencia deseada. Cuando se termina de calcular la resistencia, el programa informa al usuario y finalmente el mismo puede observar todos los resultados numéricos y gráficos obtenidos.

El programa incluye un sistema de decisión económica que optimiza la malla, especialmente cuando va a calcular la resistencia a partir de una malla que ya cumple con los potenciales. Dicha decisión se basa en: **¿Será mejor colocar conductores horizontales o barras verticales?** [16]. Atendiendo también a los requerimientos y realidades técnicas.

En el resultado gráfico, el usuario puede observar la configuración de los electrodos horizontales y de las barras verticales (de tenerlas) haciendo que sea más fácil lograr una proyección de la misma en la vida práctica, ya que también cuenta con un sistema de escala autoajustado.

En el siguiente capítulo se hará una validación del STI 1.0 con respecto a los ejemplos prácticos de la norma y una comparación con el método usado en el PAST 1.0. En dicha validación se podrá observar la secuencia gráfica del programa especialmente a la hora de introducir los datos. [16]

CAPÍTULO 3. VALIDACIÓN DEL STI 1.0. STI Vs. PAST

Una vez concluida la realización del programa para analizar, proyectar y simular sistemas de puesta a tierra por la norma de la IEEE Std 80 del 2000: STI 1.0, es necesaria su validación y comparación con otros métodos, con el objetivo fundamental de ser usado como medio de enseñanza en la asignatura de Sistemas de Puesta a Tierra.

3.1 Ejemplos de la Norma IEEE 80-2000

3.1.1 Ejemplo de malla cuadrada sin varillas

En la **Tabla 3.1** se puede apreciar los datos introducidos al STI 1.0 según su primer ejemplo (en terrenos homogéneos). [\[1\]](#) [\[12\]](#) [\[16\]](#)

Tabla 3.1. Datos propuestos en el primer ejemplo de la norma.

Datos	Valor	Unidad
Tiempo de despeje de la falla	0.5	seg
Resistividad superficial del terreno	2500	Ohm.m
Espesor de la capa superficial	0.102	m
Profundidad de enterramiento	0.5	m
Área de la instalación	70 x 70	m ²
Tipo de conductor usado	Cu G=97%	-
Largo de las barras verticales	7.5	m
Resistividad del terreno	400	Ohm.m
Corriente simétrica de falla	3180	A
Relación X/R del sistema	3.33	-
Espaciamiento entre conductores	7	m
Factor de división de corriente	60	-
Peso del individuo	70	kg

En la **Figura. 3.1** se puede observar la forma de introducir los datos al STI 1.0. [16]

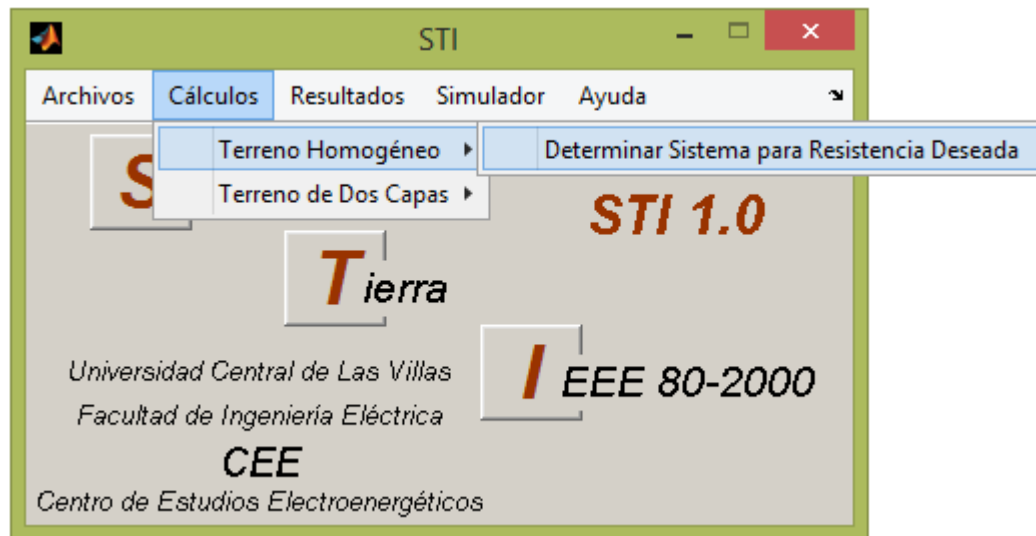
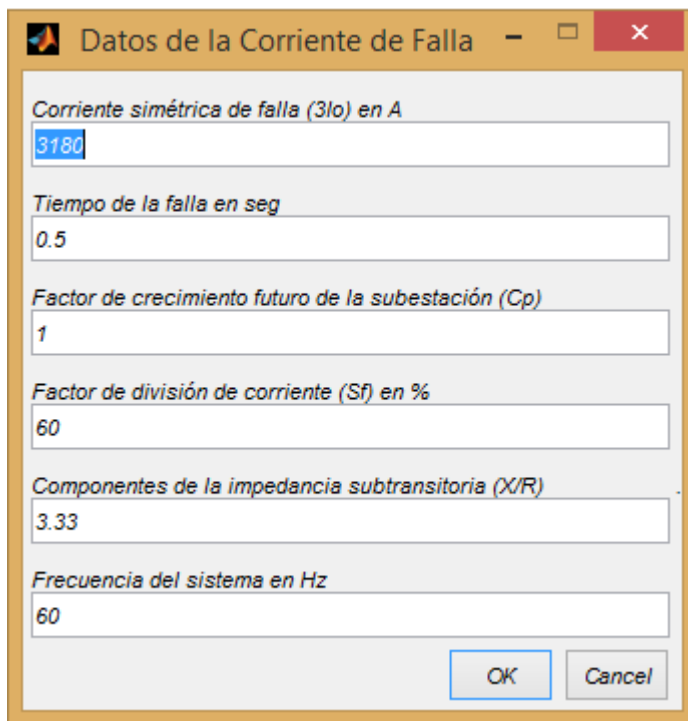


Fig. 3.1. Primera secuencia de menú para introducir los datos.

A continuación, se puede apreciar las secuencias de entrada de datos en terrenos homogéneos, a seguidamente en la **Figura. 3.2. (a-g)**. [16]

The image shows a dialog box titled 'Datos del Terreno'. It contains five input fields with labels in Spanish. The first field is 'Resistividad del Terreno en Ohm.m' with the value '400'. The second field is 'Resistividad de la capa superficial en Ohm.m' with the value '2500'. The third field is 'Espesor de la capa superficial en m' with the value '0.102'. The fourth field is 'Longitud del area disponible en m' with the value '70'. The fifth field is 'Ancho del area disponible en m' with the value '70'. At the bottom right, there are 'OK' and 'Cancel' buttons.

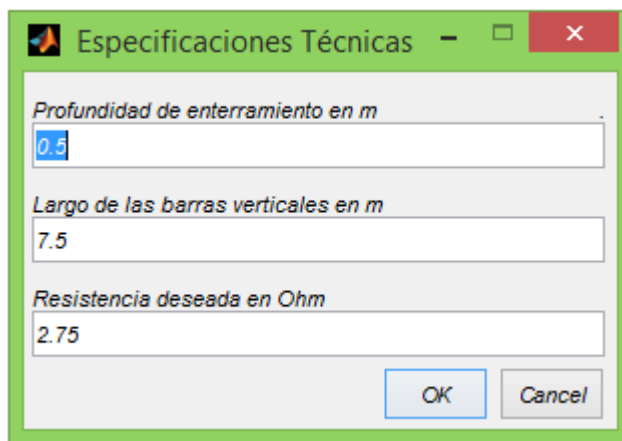
Figura. 3.2.a) Datos del Terreno.



A screenshot of a software dialog box titled "Datos de la Corriente de Falla". The dialog box has a yellow border and a standard Windows-style title bar with a minimize button, a maximize button, and a close button. Inside the dialog, there are several input fields with labels in Spanish. The first field is labeled "Corriente simétrica de falla (3Io) en A" and contains the value "3180". The second field is labeled "Tiempo de la falla en seg" and contains "0.5". The third field is labeled "Factor de crecimiento futuro de la subestación (Cp)" and contains "1". The fourth field is labeled "Factor de división de corriente (Sf) en %" and contains "60". The fifth field is labeled "Componentes de la impedancia subtransitoria (X/R)" and contains "3.33". The sixth field is labeled "Frecuencia del sistema en Hz" and contains "60". At the bottom right of the dialog, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

Label	Value
Corriente simétrica de falla (3Io) en A	3180
Tiempo de la falla en seg	0.5
Factor de crecimiento futuro de la subestación (Cp)	1
Factor de división de corriente (Sf) en %	60
Componentes de la impedancia subtransitoria (X/R)	3.33
Frecuencia del sistema en Hz	60

Fig. 3.2.b) Datos de la corriente de Falla.



A screenshot of a software dialog box titled "Especificaciones Técnicas". The dialog box has a green border and a standard Windows-style title bar with a minimize button, a maximize button, and a close button. Inside the dialog, there are three input fields with labels in Spanish. The first field is labeled "Profundidad de enterramiento en m" and contains the value "0.5". The second field is labeled "Largo de las barras verticales en m" and contains "7.5". The third field is labeled "Resistencia deseada en Ohm" and contains "2.75". At the bottom right of the dialog, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

Label	Value
Profundidad de enterramiento en m	0.5
Largo de las barras verticales en m	7.5
Resistencia deseada en Ohm	2.75

Fig. 3.2.c) Especificaciones técnicas.

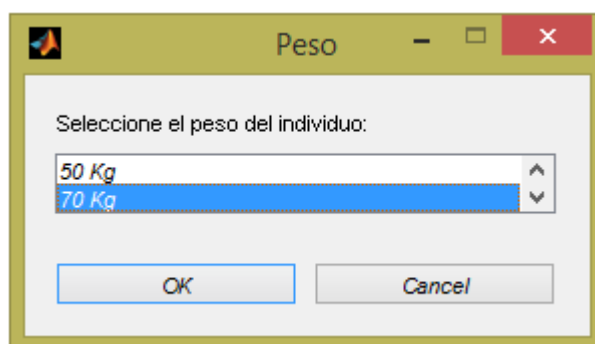


Fig. 3.2.d) Peso del individuo.

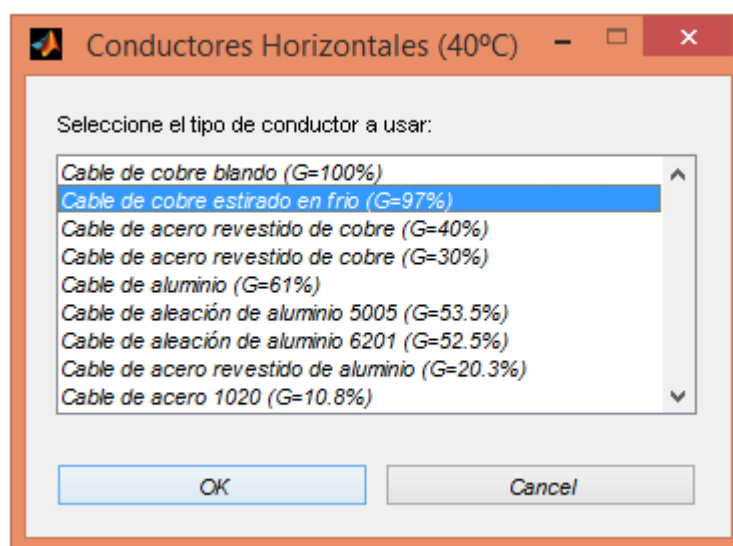


Fig. 3.2.e) Tipo de conductor a usar.

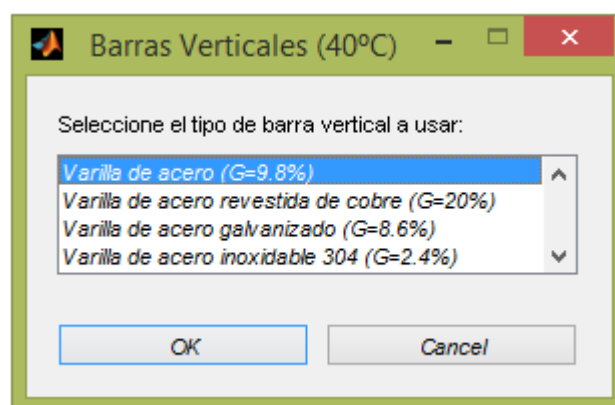
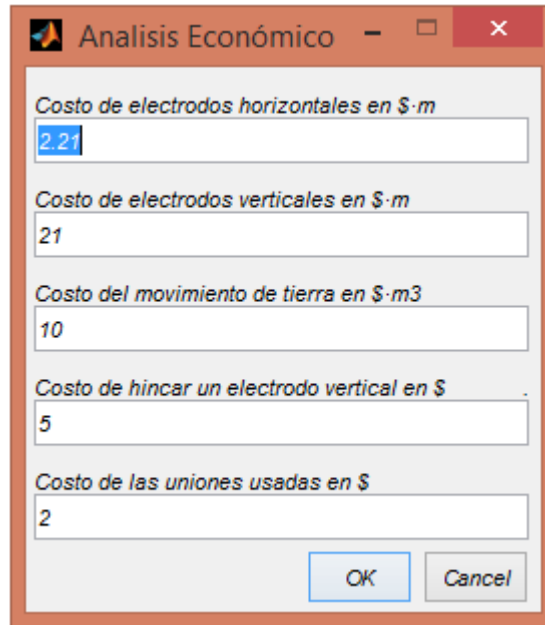


Fig. 3.2.f) Tipo de barras verticales a usar.



Costo de electrodos horizontales en \$.m
2.21

Costo de electrodos verticales en \$.m
21

Costo del movimiento de tierra en \$.m3
10

Costo de hincar un electrodo vertical en \$
5

Costo de las uniones usadas en \$
2

Fig. 3.2.g) Datos económicos.

Una vez terminados los cálculos realizados, el STI 1.0 muestra un mensaje de conclusión de cálculos como se aprecia en la **Figura. 3.3.** [16]

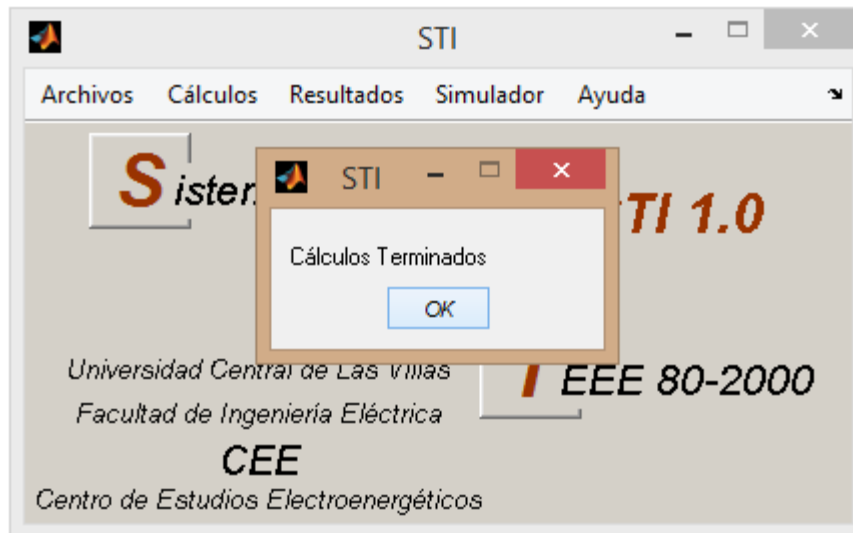


Figura. 3.3. Mensaje de resultados terminados.

Luego de ver este mensaje, el usuario debe ir al menú **Resultados**, para observar la conformación de la malla propuesta por el programa. En la **Figura. 3.4** se puede observar cómo se accede a estos resultados. [16]

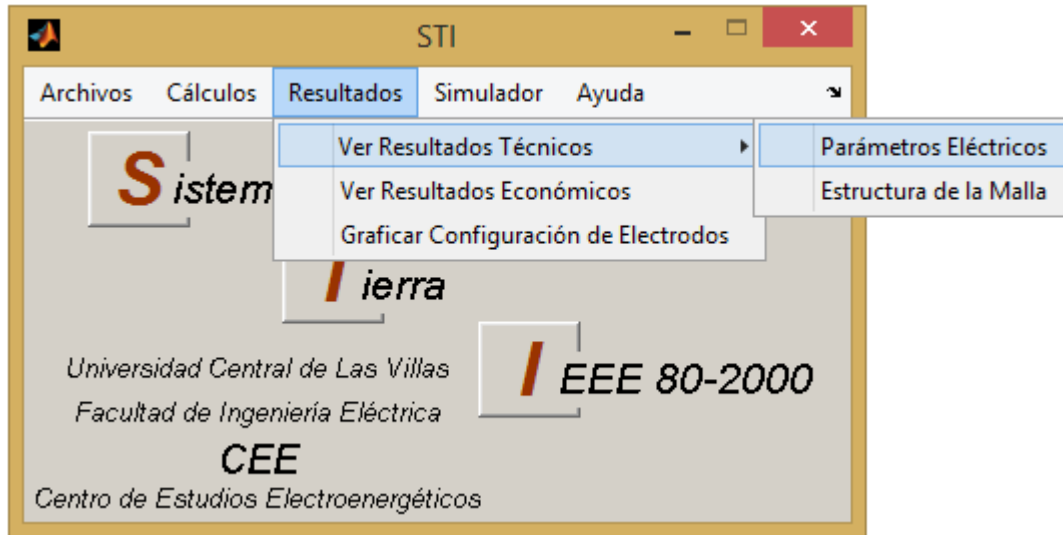


Figura. 3.4. Accediendo a los resultados del estudio realizado.

Luego el usuario puede ver el tipo de resultado deseado, basándose en la clasificación que da el programa. Puede apreciarse en la **Figura. 3.5. (a-d)**. [16]

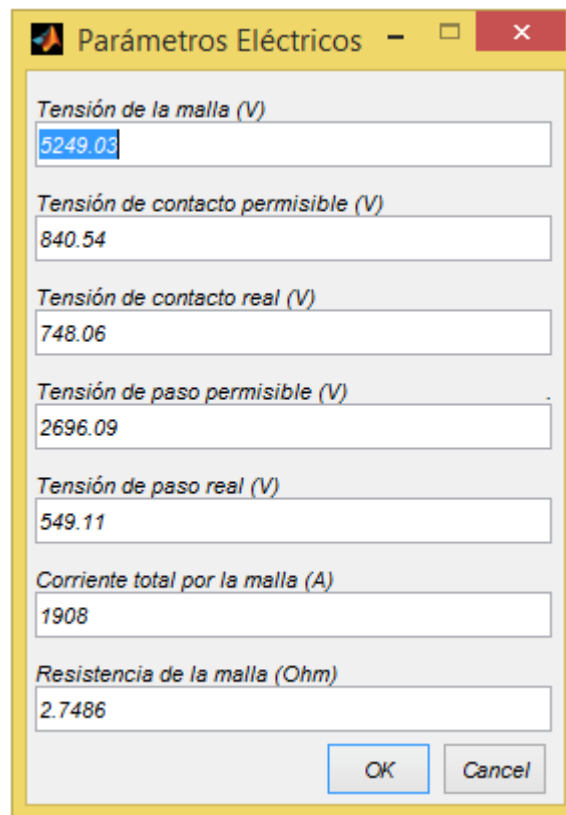
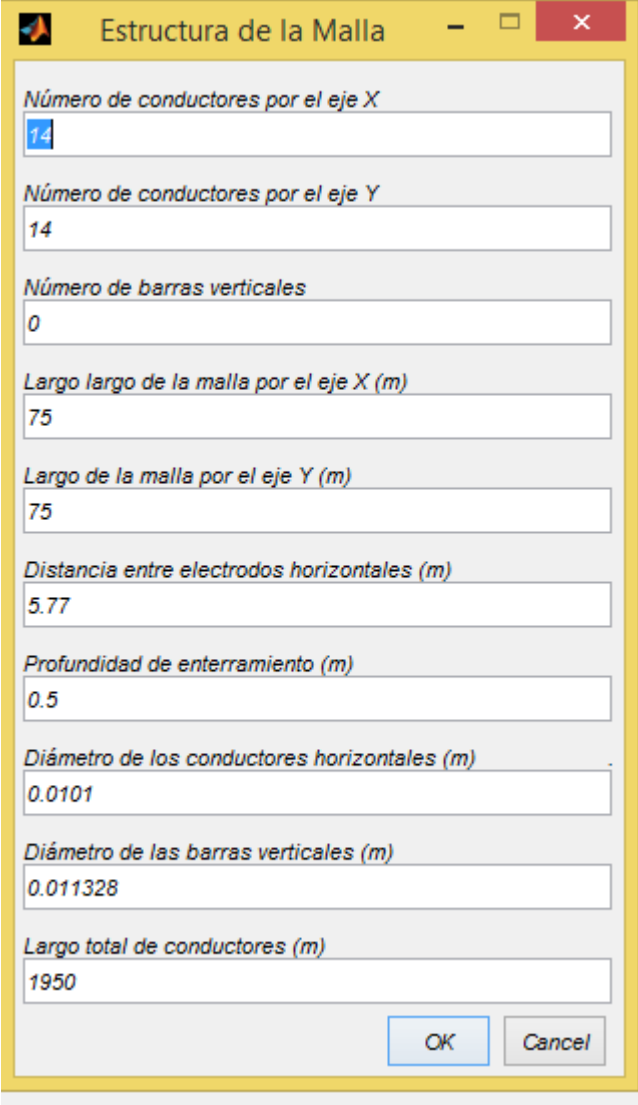


Figura. 3.5.a) Parámetros eléctricos.

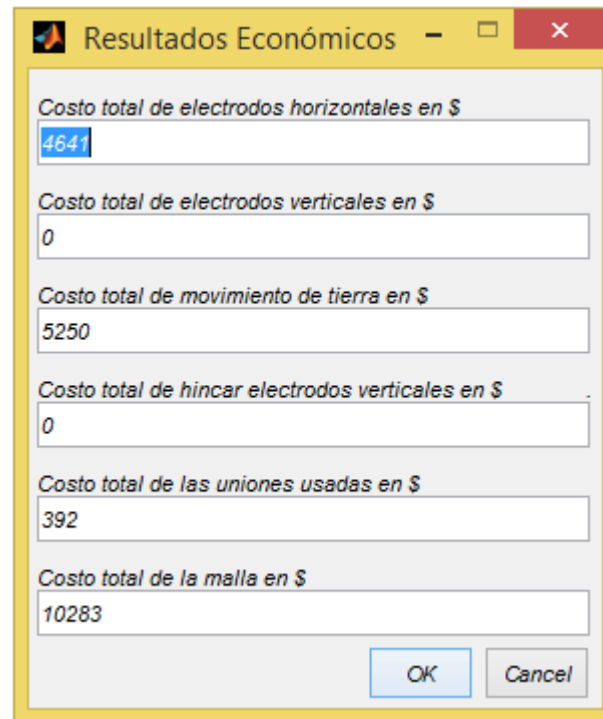


The image shows a software dialog box titled "Estructura de la Malla". It contains several input fields with the following labels and values:

- Número de conductores por el eje X: 14
- Número de conductores por el eje Y: 14
- Número de barras verticales: 0
- Largo largo de la malla por el eje X (m): 75
- Largo de la malla por el eje Y (m): 75
- Distancia entre electrodos horizontales (m): 5.77
- Profundidad de enterramiento (m): 0.5
- Diámetro de los conductores horizontales (m): 0.0101
- Diámetro de las barras verticales (m): 0.011328
- Largo total de conductores (m): 1950

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

Figura. 3.5.b) Estructura de la malla.



Resultados Económicos

Costo total de electrodos horizontales en \$
4641

Costo total de electrodos verticales en \$
0

Costo total de movimiento de tierra en \$
5250

Costo total de hincar electrodos verticales en \$
0

Costo total de las uniones usadas en \$
392

Costo total de la malla en \$
10283

OK Cancel

Figura. 3.5.c) Resultados económicos.

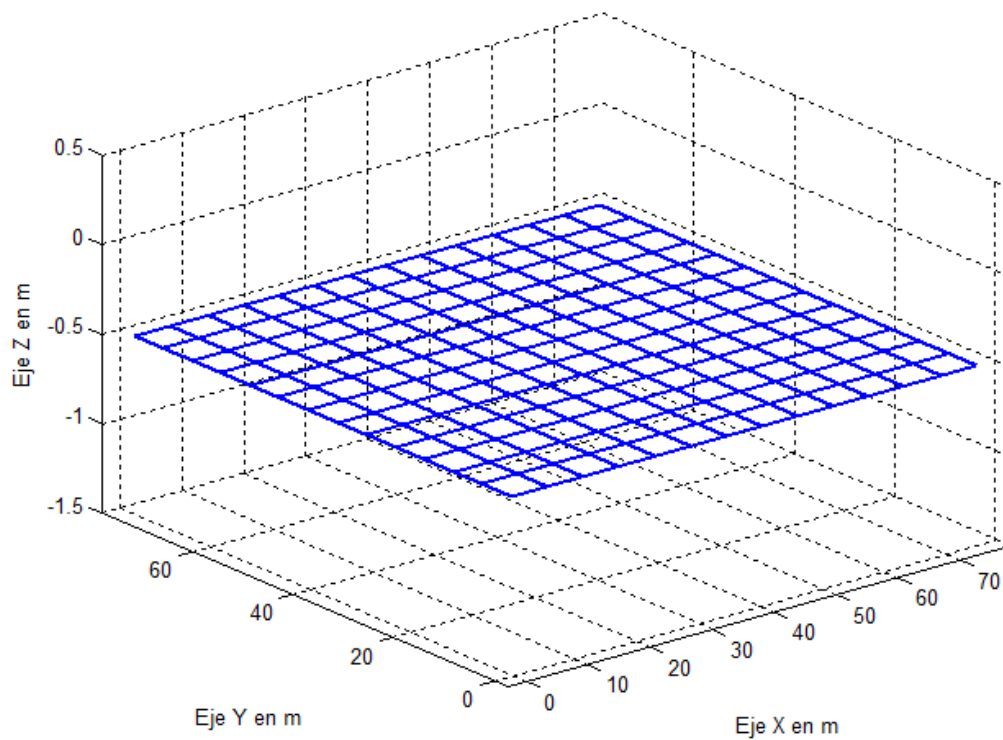


Figura. 3.5.d) Configuración de electrodos en la malla.

A continuación, en la **Tabla 3.2** se hace una comparación de resultados para este ejemplo:

Tabla. 3.2. Comparación de resultados Norma - STI 1.0.

Parámetros	Ejemplo IEEE 80-2000	STI 1.0
Resistencia de tierra lograda	2.75 Ohm	2.7486 Ohm
Potencial de la malla	5247 V	5249.03 V
Tensión de contacto real	747.4 V	748.06 V
Tensión de paso real	548.9 V	549.11 V
Tensión de contacto permisible	838.2 V	840.54 V
Tensión de paso permisible	2686.6 V	2696.09 V
Corriente inyectada	1908	1908
Conductores en X	11	14
Conductores en Y	11	14
Barras verticales	20	0
Largo de la malla por X	70 m	75 m
Largo de la malla por Y	70 m	75 m
Distancia entre conductores	7 m	5.77 m
Diámetro de	0.01	0.01 m
Costo de la malla	\$ 10745	\$ 10283

(*) Rd= 2.75 Ohm

Los resultados anteriores, obtenidos por el STI 1.0, proponen una malla similar en cuanto a parámetros eléctricos a la obtenida por la norma; pero en cuanto a resultados de configuración y por consiguiente, económicos, tiene ciertas discrepancias. Esto está dado porque el STI 1.0 analiza cual es la mejor variante de configuración con vistas a la mejor opción económica. Se puede apreciar que en el ejemplo propuesto por la norma, arbitrariamente se colocan 20 electrodos verticales y sin embargo, el STI 1.0 prefiere conectar hasta 14 electrodos horizontales sin electrodos verticales, para lograr similares parámetros eléctricos y por consiguiente una malla más barata.

Es necesario aclarar que existen ciertos errores de aproximación en el cálculo realizado por el STI 1.0, dado por el método usado por MatLab de cuatro lugares decimales. En los niveles de voltaje y corriente tratados, una diferencia como la mostrada no introduce error en cualquier tipo de diseño.

En la **Figura 3.6** se puede apreciar la configuración de electrodos para este ejemplo, siguiendo la propuesta de la norma y graficado por el STI 1.0.

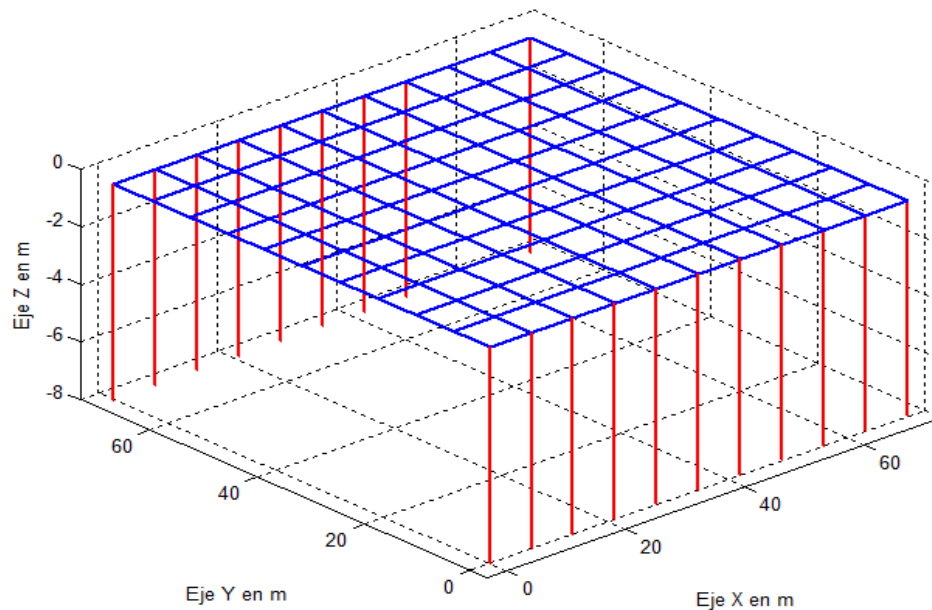


Figura. 3.6. Configuración de la malla según el ejemplo de la norma.

3.1.2 Ejemplo de malla rectangular con varillas de tierra

En la **Tabla 3.4** se puede apreciar los datos introducidos al STI 1.0 según su segundo ejemplo (en terrenos homogéneos). [1]

Tabla 3.4. Datos propuestos en el segundo ejemplo de la norma.

Datos	Valor	Unidad
Tiempo de despeje de la falla	0.5	seg
Resistividad superficial del terreno	2500	Ohm.m
Espesor de la capa superficial	0.102	m
Profundidad de enterramiento	0.5	m
Área de la instalación	84 x 63	m ²
Tipo de conductor usado	Cu G=97%	-
Largo de las barras verticales	10	m
Resistividad del terreno	400	Ohm.m
Corriente simétrica de falla	3180	A
Relación X/R del sistema	3.33	-
Espaciamiento entre conductores	7	m
Factor de división de corriente	60	-
Peso del individuo	70	kg

Luego de introducir todos estos datos en el STI 1.0, como se pudo apreciar en el primer ejemplo de la norma, se obtienen los siguientes resultados mostrados en la **Tabla 3.5**.

Tabla 3.5. Resultados del segundo ejemplo de la norma.

Parámetros	Ejemplo IEEE 80-2000	STI 1.0
Resistencia de tierra lograda	2.62 Ohm	2.6191 Ohm
Potencial de la malla	4998.96 V	5001.56 V
Tensión de contacto real	595.8 V	599.36 V
Tensión de paso real	505.84 V	503.23 V
Tensión de contacto permisible	838.2 V	840.54 V
Tensión de paso permisible	2686.6 V	2696.09 V
Corriente inyectada	1908	1908
Conductores en X	10	12
Conductores en Y	13	14
Barras verticales	38	0
Largo de la malla por X	84m	88.63 m
Largo de la malla por Y	63 m	75 m
Distancia entre conductores	7 m	6.81 m
Diámetro de	0.01 m	0.01 m
Costo de la malla	\$ 16244	\$ 10291.22

(*) $R_d = 2.62 \text{ Ohm}$

Como se puede observar, nuevamente el STI 1.0 propone la mejor variante económica con respecto a los resultados del ejemplo arbitrario de la norma, igualando a la vez los mismos parámetros técnicos-eléctricos.

Basándose en este ejemplo de la norma, también se puede decir que el STI 1.0 cumple con sus regulaciones.

Es necesario aclarar que existen ciertos errores de aproximación en el cálculo realizado por el STI 1.0, dado por el método usado por MatLab de cuatro lugares decimales. En los niveles de voltaje y corriente tratados, una diferencia como la mostrada no introduce error en cualquier tipo de diseño.

A continuación, en la **Figura. 3.7.a)**, se aprecia la configuración obtenida por el STI 1.0, y en la **Figura. 3.7.b)**, la establecida por la norma IEEE 80 del 2000 en su segundo ejemplo.

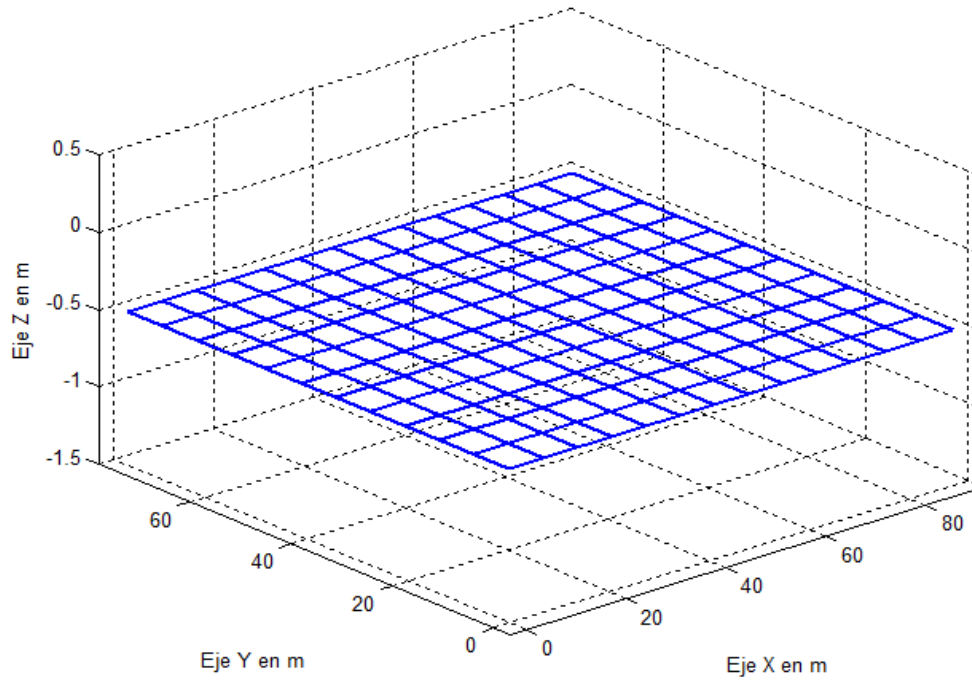


Figura. 3.7.a) Configuración de electrodos obtenida por el STI 1.0.

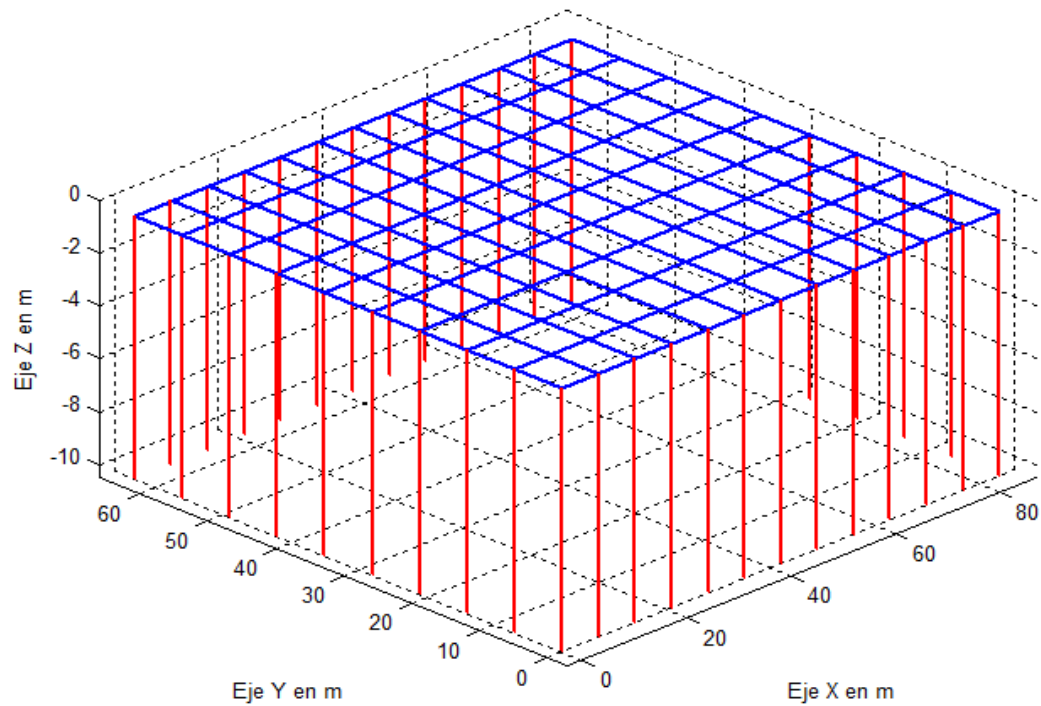


Figura. 3.7.b) Configuración de la malla según el ejemplo de la norma.

3.2 Comparación del STI 1.0 con el PAST 1.0

Una vez validado el STI 1.0 con respecto a la norma por la cual fue programado, mediante un método aproximado y contrariamente al usado en el PAST 1.0, es necesario hacer una comparación con dicho programa, para observar las diferencias y semejanzas y finalmente arribar a conclusiones.

3.2.1 Ejemplo comparativo

Para esta comparación se toma un ejemplo aleatorio de una malla de puesta a tierra cuyos datos se aprecian en la **Tabla 3.6**. Después de ejecutar ambos programas, en la **Tabla 3.7** se observan los resultados obtenidos y se establece una comparación.

Tabla 3.6. Datos de una malla de puesta a tierra.

Datos	Valor	Unidad
Tiempo de despeje de la falla	1	seg
Resistividad superficial del terreno	2500	Ohm.m
Espesor de la capa superficial	0.1	m
Profundidad de enterramiento	0.8	m
Área de la instalación	150 x 100	m ²
Tipo de conductor usado	Cu G=97%	-
Largo de las barras verticales	3	m
Resistividad del terreno	100	Ohm.m
Corriente simétrica de falla	3180	A
Relación X/R del sistema	3.33	-
Factor de división de corriente	60	-
Peso del individuo	70	kg

Tabla 3.7. Comparación PAST 1.0 – STI 1.0.

Parámetros	PAST 1.0	STI 1.0
Resistencia de tierra lograda	0.44 Ohm	0.41 Ohm
Potencial de la malla	1104.51 V	790.018 V
Tensión de contacto real	446.8 V	182.04 V
Tensión de paso real	106.43	52.45 V
Tensión de contacto perm.	698.54 V	738.06 V
Tensión de paso perm.	2323.18 V	2481.24 V
Corriente inyectada	1908 A	1908 A
Conductores en X	3	8
Conductores en Y	3	11
Barras verticales	6	0
Largo de la malla por X	150 m	150 m
Largo de la malla por Y	100 m	105 m
Distancia entre conductores	-	15 m
Diámetro de	0.01 m	0.009 m
Costo de la malla	\$ 4832	\$ 14800

(*) Rd= 1 Ohm

Como se observa, existe cierta similitud entre los parámetros eléctricos obtenidos, pero existe una discrepancia considerable en cuanto a resultados de configuración de la malla, y principalmente en el costo de la misma.

El la **Figura. 3.8. a y b)**, se muestran las configuraciones de electrodos obtenidas por el STI 1.0 y por el PAST 1.0 respectivamente.

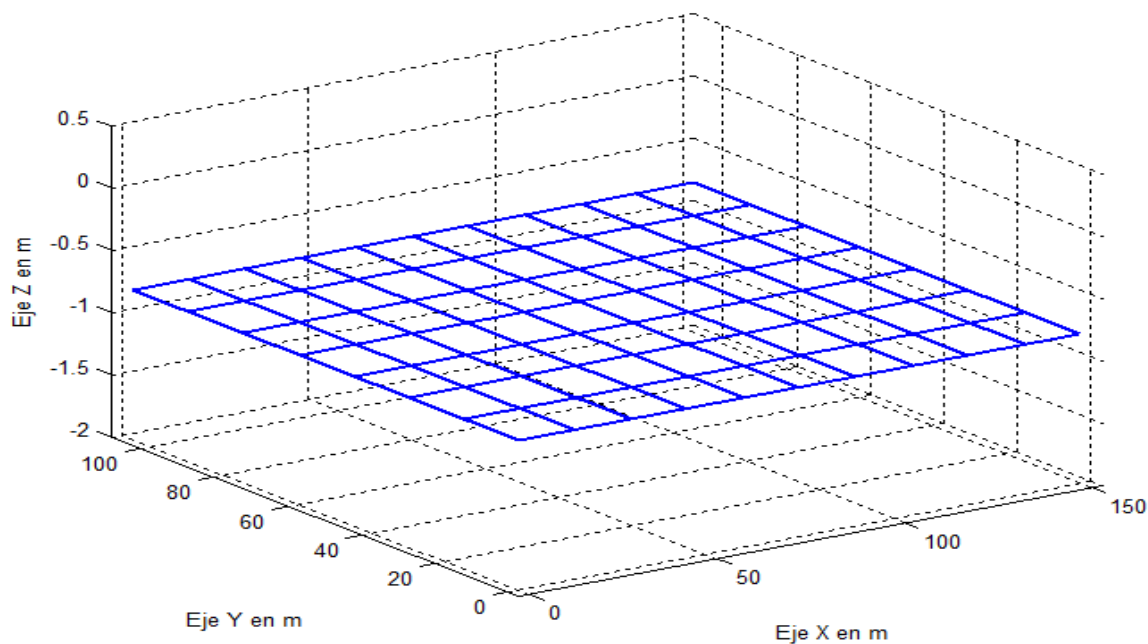


Figura. 3.8.a) Configuración de la malla obtenida por el STI 1.0.

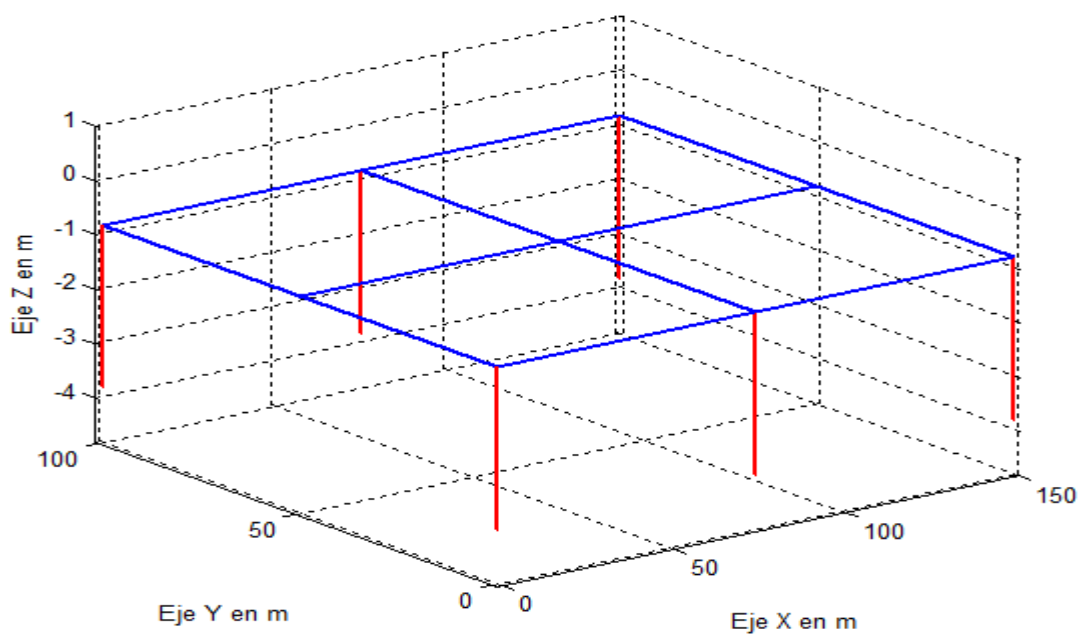


Figura. 3.8.b) Configuración de la malla obtenida por el PAST 1.0.

En conclusión, el programa PAST hace un uso de menor de materiales y obtiene mejores resultados técnicos que la norma IEEE 80 del 2000.

3.3 Conclusiones del capítulo

Terminada la validación del STI 1.0 con respecto a los ejemplos de la norma por la cual fue programado, se arriba a la conclusión que es un programa capaz de hacer cálculos semejantes de forma óptima con respecto a dicha norma.

Con respecto al PAST 1.0, existen grandes diferencias, sobre todo económicas. La diferencia mayor consiste en la amplia gama de variantes que desarrolla el PAST 1.0 contra una efímera serie de configuraciones limitadas propuestas por la Norma IEEE 80 del 2000. El PAST 1.0 constituye un programa profesional para el diseño de sistemas de puesta a tierra por un método exacto, por lo que no sería justo hacer una comparación para un proyecto futuro con ambos métodos; solamente que se simule realmente lo que sucedería con estas mallas para una inyección de corriente dada.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Una vez concluido el presente trabajo de diploma, se puede arribar a las siguientes conclusiones:

- ✓ Se hizo una exhaustiva revisión bibliográfica de la Norma IEEE Std 80 del 2000, mediante la cual se pudo acceder a todas sus expresiones y consideraciones para realizar el diseño correcto de una malla de puesta a tierra.
- ✓ Se logró diseñar una interfaz gráfica con un ambiente sumamente amistoso con el usuario.
- ✓ Los códigos de programación empleados permiten que el STI 1.0 tenga una estructura simple pero robusta, convirtiéndolo en un programa rápido y preciso.
- ✓ Se pudo validar el STI 1.0, con los ejemplos de la Norma IEEE 80 del 2000, comprobando su similitud.
- ✓ Se hizo una comparación del STI 1.0 con el PAST 1.0, demostrando el distanciamiento entre ambos métodos, especialmente en la esfera económica, en la cual el STI 1.0 propone variantes más costosas. Vale destacar que ambos métodos proponen buenos resultados técnicos.

Recomendaciones

- ✓ Se recomienda que el STI 1.0 forme parte del paquete de programas de la carrera de Ingeniería Eléctrica, y especialmente como medio de enseñanza para la asignatura de Sistemas de Puesta a Tierra.
- ✓ Dar a conocer al STI 1.0 a los especialistas de la UNE para que sea usado como herramienta en proyectos de subestaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, 2000.
- [2] F. D. Bianchi, "Introducción al MatLab," pp. Universidad Nacional de la Plata, Argentina, 2001.
- [3] D. O. Barragán Guerrero. (2008) Manual de interfaz gráfico de usuario en MatLab.
- [4] P. O., "Manual para el Proyecto y Análisis de Sistemas de Puesta a Tierra," I. A. Ltda, Ed., ed. Chile, 1997.
- [5] A. J. L., *Temas de Ingeniería Eléctrica* vol. Tomo II. Habana, Cuba.
- [6] R. García Márquez, *La puesta a tierra de instalaciones eléctricas*. Barcelona, España, 1999.
- [7] ProCobre, *Sistemas de puesta a tierra*. Santiago de Chile, Providencia, 1999.
- [8] M. G. Aponte Mayor. (Julio 2009) Puesta a tierra.
- [9] R. Chiriboga. (2008) Sistema de puesta a tierra normalizado para centros de transformación.
- [10] M. Hernando. (2011-2012, Manual Pedagógico) Sistemas de puesta a tierra.
- [11] CooperAssociation, "Sistemas de puesta a tierra, fundamentos de cálculo y diseño," 2003.
- [12] IEEE, "Guía para la puesta a tierra en una subestación," vol. Norma IEEE 80-2000, 2006.
- [13] J. y. C. P. Ramírez Castaño, Eduardo. (2010) Sistema de puesta a tierra diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF.
- [14] Á. C. Valcárcel, "Sistemas de puesta a tierra y protección de equipos electrónicos sensibles," Centro de Estudios Electroenergéticos, UCLV, Santa Clara, Cuba, 2007.
- [15] M. de la Vega Ortega, *Problemas de ingeniería de puesta a tierra*. México D.F, 2002.
- [16] V. R. Jara González, "Manual de usuario para el STI 1.0," vol. Versión 1.0, U. C. d. L. Villas, Ed., ed. Santa Clara, Cuba, 2015.