



TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO

Interfaz gráfica para el diseño de sistemas de puesta a tierra “SPT”, mejoramiento de SPT existentes e interconexión de mallas.

AUTORES

Oscar Mauricio Zambrano Sánchez 1095909993

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍAS
INGENIERÍA ELÉCTRICA
BUCARAMANGA
FECHA DE PRESENTACIÓN: 11-09-2020**



TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO

Interfaz gráfica para el diseño de sistemas de puesta a tierra “SPT”, mejoramiento de SPT existentes e interconexión de mallas.

AUTORES

Oscar Mauricio Zambrano Sánchez 1095909993

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero electricista

DIRECTOR

Ing. MPE. Fabio Alfonso González

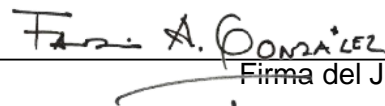
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA - GIE

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍAS
INGENIERÍA ELÉCTRICA
BUCARAMANGA
FECHA DE PRESENTACIÓN: 11-09-2020**

Nota de Aceptación



Firma del jurado



Firma del Jurado

DEDICATORIA

Dedico de forma especial a mi madre, cuyo amor inmensurable, esfuerzo, apoyado sin límites y grandes enseñanzas en el transcurso de mi vida han forjado mi carácter y determinación para culminar mis metas, de los cuales abarco mi título de profesional.

A mi hijo por ser el motivo para seguir adelante, motivándome cada día a ser mejor padre para en un futuro mi camino llegue a ser un ejemplo para él. A mi novia e hijo por su amor, cariño y comprensión durante el tiempo que hemos vivido juntos.

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia elevar mis agradecimientos a Dios todo poderoso por brindarme paciencia y sabiduría para progresar día a día, superando obstáculos en mi vida, creciendo mi ámbito personal y profesional.

Agradezco a las Unidades Tecnológicas de Santander por la oportunidad de estudiar en sus instalaciones, a la coordinación de ingeniería eléctrica en cabeza de su coordinador Ing. Édgar Efraín Niño Velandia y al selecto grupo de docentes, por su gestión para la llegada de la ingeniería eléctrica a la institución. Un agradecimiento al ingeniero Néstor Fernando Martínez Pereira, al ingeniero Juan Pablo Medina Estor y al Ingeniero Fabio Alfonso González docentes de las UTS, por compartir sus conocimientos en mi formación profesional y sus grandes aportes en aras de la culminación de la presente tesis de grado.

A la empresa Celec de Colombia s.a.s, en cabeza de su gerente el ingeniero Mario Alberto Martínez Chaparro y su socio el señor Cecilio Alberto Vera, por su comprensión y apoyo incondicional durante el tiempo que me ha tomado culminar mis estudios de ingeniería, mis agradecimientos al ingeniero Juan Carlos Flórez por su aporte en el presente proyecto de grado.

A mis compañeros de aula, amigos y allegados que me brindaron su amistad y compañerismo, aportando sus conocimientos y vivencias, llevando así a tener diferentes conceptos tanto personales como profesionales.

TABLA DE CONTENIDO

<u>RESUMEN EJECUTIVO</u>	<u>11</u>
<u>INTRODUCCIÓN</u>	<u>12</u>
<u>1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN</u>	<u>13</u>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	15
1.3. OBJETIVOS	16
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	16
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.4. ESTADO DEL ARTE/ ANTECEDENTES	16
<u>2. MARCOS REFERENCIALES</u>	<u>18</u>
2.1.1. MARCO TEÓRICO	18
2.1.2. MARCO CONCEPTUAL	25
2.1.3. MARCO LEGAL.....	26
2.1.4. MARCO AMBIENTAL	28
<u>3. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO</u>	<u>29</u>
3.1. DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS DE SPT Y METODOLOGÍAS PARA LA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD Y RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	29
3.1.1. RESISTIVIDAD.....	29
3.1.2. MÉTODOS PARA MEDIR LA RESISTENCIA	38
3.2. ANÁLISIS DE MÉTODOS DE DISEÑO, INTERCONEXIÓN Y MEJORAMIENTO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA	40
3.2.1. RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	40
3.2.2. CÁLCULO DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	41
3.2.3. VENTAJAS DE APLICACIÓN DE MATERIALES MEJORADORES	56
3.2.4. CÁLCULOS DE SPT CON ESTÁNDAR IEEE 80-2013.....	56
3.2.5. MEJORAMIENTO DE SPT EXISTENTE	70
3.3. DESARROLLO DE LA INTERFAZ GRÁFICA	71
3.3.1. DESCRIPCIÓN HERRAMIENTA SOFTWARE.....	71
3.4. VALIDACIÓN DE INTERFAZ GRÁFICA	82
<u>4. RESULTADOS</u>	<u>83</u>
4.1. VALIDACIÓN DE SOFTWARE	83
4.2. DATOS DE INGRESO	83
4.2.1. CÁLCULO RESISTIVIDAD HOMOGÉNEA	84
4.2.2. RESISTIVIDAD HOMOGÉNEA CON TOTAL GRID	85

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO Y
PRÁCTICA

VERSIÓN: 01

4.3.	CÁLCULO RESISTENCIA DE ELECTRODOS VERTICALES	86
4.3.1.	VARILLAS CON MEJORADOR	87
4.3.2.	VARILLAS SIN MEJORADOR	88
4.4.	ELECTRODO HORIZONTAL	89
4.4.1.	ELECTRODO HORIZONTAL CON TRATAMIENTO	92
4.5.	PLACAS	96
4.6.	MALLAS	97
4.7.	MEJORAR SPT EXISTENTE	99
4.8.	IEEE	110
5.	<u>CONCLUSIONES</u>	<u>128</u>
6.	<u>RECOMENDACIONES</u>	<u>130</u>
7.	<u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>131</u>
8.	<u>ANEXOS</u>	<u>135</u>
8.1.	ANEXO A	136
8.2.	ANEXO B	137

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Diagrama de flujo diseño por IEEE 80-2013.	19
Figura 2-2. Método variación de profundidad.	21
Figura 2-3. Método de Wenner	21
Figura 2-4. Método de Schlumberger.....	21
Figura 2-5. Método de la caída de potencial	22
Figura 2-6. Método de sujeción.....	22
Figura 2-7. Método utilizando FOP y medida de corrientes de fuga	22
Figura 2-8. Medida por multímetro de tierra por computadora.....	23
Figura 2-9. Prueba de falla de bajo voltaje.....	23
Figura 2-10. Medida tensión de contacto con medidores de tierras conversionales	24
Figura 2-11. Medida de tensiones con multímetro de puesta a tierra por computadora....	24
Figura 2-12. Prueba de equipotencialización	25
Figura 2-13. Equipotencialización de SPT.	27
Figura 3-1. Resistividad vs concentración de sales.....	30
Figura 3-2. Resistividad vs temperatura.....	31
Figura 3-3. Resistividad vs concentración de humedad	32
Figura 3-4. Resistividad vs profundidad de medida.....	37
Figura 3-5. Gráfica método de Sunde	37
Figura 3-6 grafica impedancia vs distancia de sondeo	39
Figura 3-7. Placa de cobre enterrada.....	42
Figura 3-8. Variación de resistividad debido a las estaciones.	42
Figura 3-9. Electrodo vertical	43
Figura 3-10. Efectividad en electrodos en paralelo.....	44
Figura 3-11. Profundidad de enterramiento electrodo horizontal	45
Figura 3-12. Tratamiento con sales.....	51
Figura 3-13. Mejorador de varios materiales.	52
Figura 3-14. Electrodo electrolítico.....	52
Figura 3-15. Bentonita ARCICOL.....	53
Figura 3-16. Radio equivalente con mejorador.....	53
Figura 3-17. Cemento conductivo celec.....	54
Figura 3-18. Rutas medidas de resistividad.	57
Figura 3-19. Detalle rejilla malla puesta a tierra	62
Figura 3-20. TOTAL GRID	71
Figura 3-21. Esquema funcionamiento TOTAL GRID	72
Figura 3-22. Pantalla inicial TOTAL GRID.....	73
Figura 3-23. IEEE datos iniciales.	74
Figura 3-24. IEEE resistividad.....	74
Figura 3-25. IEEE diseño de malla.....	75
Figura 3-26. IEEE tensiones reales y tolerables.....	75
Figura 3-27. Panel selección varillas.....	76
Figura 3-28. Panel análisis resistividad homogénea.	76
Figura 3-29. Panel resistencia varillas.....	77
Figura 3-30. Panel resistencia varillas con tratamiento.	77

Figura 3-31. Panel electrodo horizontal	78
Figura 3-32. Panel electrodo horizontal tipo estrella.....	78
Figura 3-33. Panel anillo perimetral	79
Figura 3-34. Panel electrodo horizontal con tratamiento químico.....	79
Figura 3-35. Panel topología tipo contra-antenas.....	80
Figura 3-36. Panel electrodos tipo placa	80
Figura 3-37. Panel RPT de mallas.	81
Figura 3-38. Panel mejorar SPT existente	81
Figura 4-1. Calculo resistividad TOTAL GRID.....	86
Figura 4-2. Parámetros para varillas.	86
Figura 4-3. Parámetros para varilla con mejorador	87
Figura 4-4. Parámetros para electrodo horizontal	89
Figura 4-5. Parámetros para conductor horizontal con tratamiento	93
Figura 4-6. Parámetros para electrodos tipo placa.....	96
Figura 4-7. Cálculo resistividad TOTAL GRID.....	97
Figura 4-8. Diseño de malla ejercicio.	97
Figura 4-9. Equipo a proteger.	99
Figura 4-10. Medida RPT existente.....	99
Figura 4-11. Medidas de resistividad proyecto.	100
Figura 4-12 Resultados TOTAL GRID distancia maxima entre SPT.....	101
Figura 4-13. Diseño preliminar de rejilla.....	112
Figura 4-14. Primer panel IEEE, caso 1	115
Figura 4-15. Segundo panel IEEE, caso 1	116
Figura 4-16. Tercer panel IEEE, caso 1	116
Figura 4-17. Datos ingreso rejilla, caso 1	116
Figura 4-18. Cuarto panel IEEE, caso 1.....	117
Figura 4-19. Cuarto panel IEEE, caso 2.....	120
Figura 4-20. Primer panel IEEE, caso3.....	125
Figura 4-21. Cuarto panel IEEE, caso 3.....	125

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resistividades típicas del suelo.....	20
Tabla 2. Valores de referencia para resistencia de puesta a tierra.....	27
Tabla 3. Tiempos de mantenimientos en SPT.....	27
Tabla 4. Periodo geológico y formación.....	30
Tabla 5. Función distribución normal.....	36
Tabla 6. Requisitos para electrodos de puesta a tierra.....	41
Tabla 7. Constantes de materiales.....	57
Tabla 8. Constantes de materiales.....	58
Tabla 9. Características de conductores comerciales.....	59
Tabla 10. Resistividades típicas de materiales superficiales.....	61
Tabla 11. Cálculo resistencia de rejillas.....	63
Tabla 12. Cálculo de resistencia aumentando cantidad de cable.....	63
Tabla 13. Cálculo de resistencia variando área de la malla.....	63
Tabla 14. Cálculo de resistencia utilizando mejorador de puesta a tierra.....	64
Tabla 15. Datos de ingreso experimento.....	64
Tabla 16. Condiciones de aprobación de diseño.....	69
Tabla 17. Datos resistividad ejemplo.....	83
Tabla 18. Mediana del valor pico de la corriente de retorno del rayo en diferentes zonas del planeta.....	84
Tabla 19. RPT varillas con tratamiento.....	87
Tabla 20. Resultados RPT varillas.....	88
Tabla 21. Resultados TOTAL GRID varillas sin tratamiento.....	88
Tabla 22. Resultados RPT electrodos horizontal.....	89
Tabla 23. Resultados TOTAL GRID Electrodo horizontal.....	90
Tabla 24. Resultados RPT conductor horizontal con tratamiento.....	93
Tabla 25. Resultados TOTAL GRID conductor horizontal con tratamiento.....	93
Tabla 26. Resultados TOTAL GRID mallas puesta a tierra.....	98
Tabla 27. Resultados RPT varillas, mejorar existente.....	101
Tabla 28. Resultados TOTAL GRID varillas con tratamiento, mejorar existente.....	102
Tabla 29. RPT varillas con tratamiento, mejorar existente.....	103
Tabla 30. Resultados RPT electrodo horizontal, mejorar existente.....	103
Tabla 31. Resultados TOTAL GRID electrodo horizontal, mejorar existente.....	104
Tabla 32. Resultados RPT electrodo horizontal con tratamiento, mejorar existente.....	107
Tabla 33. Resultados TOTAL GRID electrodo horizontal con tratamiento, mejorar existente.....	107
Tabla 34. Criterio de aprobación caso 1.....	115
Tabla 35. Criterio de aprobación caso 2.....	120
Tabla 36. Criterio de aprobación caso 3.....	124
Tabla 37. Datos ingreso casos IEEE 80 version 2013.....	127
Tabla 38. Resultados casos IEEE-80 mediante TOTAL GRID.....	127

RESUMEN EJECUTIVO

El trabajo de grado tiene como propósito el desarrollar una interfaz gráfica para el diseño de sistemas de puesta a tierra, conexión entre ellas y mejoramiento de existentes mediante el uso del software MATLAB. Se desarrolló mediante la relación entre variables, tales como, resistividad, área, distancia, corriente de cortocircuito, resistencia de puesta a tierra, tensiones de paso y de contacto optimizando así la disipación de energía en un evento de falla.

El proyecto de grado se creó una interfaz gráfica para cálculos de puestas a tierra mediante el algoritmo del estándar ANSI/IEEE-80 en su versión 2013 o de resistencia de puesta a tierra mediante las fórmulas para los diferentes arreglos de electrodos como lo son varillas, cables, placas metálicas, entre otros, que se acomodan a los requerimientos de las especialidades de la ingeniería, disipando fallas en un menor tiempo o como referencia en el caso de los sistemas de comunicación. Al finalizar se proporciona una herramienta que ayude a solucionar los diferentes problemas al momento de calcular un sistema de puesta a tierra, acomodándose con ello a las necesidades particulares de cada proyecto de ingeniería.

PALABRAS CLAVE. Equipotencialización, interfaz de diseño, sistema de puesta a tierra, tensión de contacto, tensión de paso.

INTRODUCCIÓN

La protección de los seres vivos, los activos de las empresas y las estructuras del sistema eléctrico es una parte importante en el diseño y construcción en proyectos de ingeniería, es por ello, que es de gran importancia el cálculo de los sistemas de puesta a tierra para una correcta disipación de la energía en eventos de falla eléctrica. En el mercado hay software que permiten calcular sistemas de puesta a tierra, pero ellos se limitan al cálculo mediante la el algoritmo presente en la IEEE-80. Para determinar la resistencia de puesta a tierra haciendo uso de diferentes topologías se requiere de una herramienta que reúna las principales ecuaciones para poder seleccionar los diferentes tipos de electrodos o la configuración a ser implementada, con ello determinar el diseño pertinente con la respectiva ecuación a ser usada, el análisis de las tensiones de paso y de contacto en puestas a tierra de subestaciones eléctricas.

En el presente proyecto se presenta una herramienta computacional en la cual se pueden obtener los cálculos de sistemas de puesta a tierra de las diferentes configuraciones existentes, con la adición de ecuaciones que implementa el uso de materiales de baja resistividad (cementos conductivos), para mejorar el valor de resistencia de las puestas a tierras. En el algoritmo de diseño de la IEEE-80 para su versión 2013 se incluye ecuaciones para la implementación de materiales de baja resistividad, ayudando a la reducción de la resistencia calculada en comparación con las metodologías incluidas en el estándar, bajo valor de las tensiones de contacto reales.

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La principal función de los sistemas de puesta a tierra es la protección del ser humano y de los equipos de las instalaciones, dando un camino sin obstrucción para el paso de la corriente de falla al suelo para su dispersión, además de minimizar los gradientes de tensión para las tensiones de paso y de contacto (Pacheco & Jiménez, 2013) (González, 2005). El diseño de sistemas de puesta a tierra (SPT) es un procedimiento que entrelaza conceptos tradicionales y prácticas de aplicación modernas teniendo varias configuraciones de electrodos dependiendo del proyecto al cual será implementado (Ruelas, 2009b).

Un incorrecto diseño del SPT puede producir en los sistemas de control y medida errores en su funcionamiento llevando como consecuencia salidas de las líneas de potencia. Para que un SPT cumpla con todas las especificaciones requeridas se debe tener las características del suelo en el área exacta donde se van a implementar los electrodos, siendo la resistividad del suelo el dato de mayor relevancia (ASTM, 2001).

El constante aumento de la demanda del sector eléctrico produce ampliación del sistema eléctrico creando con ello el aumento de las corrientes de cortocircuito en las subestaciones eléctricas, a causa de ello los sistemas de puesta a tierra deben tener la capacidad de disipar la energía producida al momento de falla protegiendo el sistema eléctrico (He, Zeng, & Zhang, 2012). Pero un bajo valor de resistencia de puesta a tierra (RPT) no es garantía de protección, debido a esta afirmación se hace recurrente hacer un análisis profundo a los efectos generados en un momento de falla en las subestaciones eléctricas como son las tensiones de paso y tensiones de contacto (IEEE Power and Energy Society, 2013).

La aplicación de mejoradores de puesta a tierra es una buena estrategia para la reducción de hasta un 40% de la RPT calculada. Esta bondad que es entregada por dichos materiales con un comportamiento de resistividad constante en el tiempo, no tiene una forma para ser implementada en los softwares que se encuentran en el mercado, ya que ellos tienen como base el diseño mediante el estándar IEEE 80- 2013, en el cual el cálculo de resistencia de la rejilla se determina mediante las ecuaciones de Sverak y de Schwartz.

Dentro de la normativa nacional se estipula la interconexión de las mallas de puesta a tierra circundantes en un mismo proyecto, con el fin de evitar posibles elevaciones de tensión por los gradientes de tensión producidos al momento del despeje de una falla atmosférica (UPME, 2013). En la práctica los operadores de red predisponen de un sistema de puesta a tierra basándose en dos electrodos verticales interconectados entre ellos, esta disposición entra en conflicto con los sistemas de control o de equipos sensibles debido a los problemas de la red eléctrica “reconexiones, flickers, zag’s, entre otros” (Malagón, Giraldo, Ordoñez, & Chacón, 2015) (Laurent, Martins, & Helou, 2010).

Los SPT debido a la necesidad de un contacto físico con el terreno son proclives a ser atacados por factores corrosivos naturales del suelo circundante como la humedad, el azufre entre otros, además los electrodos por ser elementos de circulación de corriente eléctrica en momentos de falla aumentan las probabilidades de corrosión al están en contacto con un medio acuoso como lo es el suelo (Reyna, 2007). La corrosión en los electrodos produce una disminución de la resistencia de puesta a tierra medida al momento de puesta en servicio, es por esto que los SPT deben de entrar a un plan de mantenimiento correctivo dependiendo del tipo de elementos a proteger (Basilio & Romero, 2015).

Por lo anterior, se suscita la siguiente pregunta de investigación, ¿Cómo diseñar sistemas de puesta a tierra utilizando herramientas computacionales que permitan el cumplimiento de especificaciones técnicas referidas en un proyecto?

1.2. JUSTIFICACIÓN

El sistema de puesta a tierra es parte indispensable y es el complemento de los sistemas de protección de las instalaciones eléctricas, disipando las posibles fallas en el sistema eléctrico ya sea por factores internos de operación o externas en el caso de descargas atmosféricas (González, 2005). Durante el momento de una falla en el sistema eléctrico la circulación de la corriente por la puesta a tierra produce gradientes de potencial en las áreas circundantes del SPT (IEEE Power and Energy Society, 2013). El implementar un SPT deficiente tiene graves implicaciones como lo son pérdidas de vidas humanas debido a las tensiones de paso, de contacto o tensiones transferidas, superando los umbrales de soportabilidad del ser humano al momento de falla (UPME, 2013), para lograr un efectivo sistema de puesta a tierra se requiere conocer la resistividad del terreno el cual dará la característica del suelo donde será implementado (IEEE Power and Energy Society, 2012).

Además, de pérdidas económicas para las empresas al producirse daños en infraestructuras o en equipos, en las líneas de transmisión los sistema de puesta a tierra requieren de bajos valores de resistencia de puesta a tierra (RPT) proporcionando un camino de baja impedancia a las descargas atmosféricas, evitando así posibles flameos inversos (Marungsri, Boonpoke, Rawangpai, Oonsivilai, & Kritayakornupong, 2009) (Suárez, 2004).

Los elementos del SPT al estar afectados por factores corrosivos inherente al suelo circundante deben ser seleccionados con materiales que reduzcan los efectos de corrosión (Reyna, 2007) (Basilio & Romero, 2015). Los procesos de supervisión deben ser encaminados a asegurar valores de resistencia acordes a la reglamentación nacional y el control de tensiones de paso y contacto (UPME, 2013).

La expansión de la tecnología en la industria lleva a tener distintos tipos de puestas a tierras en un mismo proyecto (Ruelas, 2009b), es por esto, que se debe garantizar que todos los SPT queden interconectados entre sí, evitando así interferencias electromagnéticas en eventos de descargas estáticas o atmosféricas quedando todas las mallas en un mismo potencial (Manani, 2013).

Esta propuesta es de relevancia significativa para el programa de ingeniería eléctrica como ayuda en la implementación académica de los conceptos sobre sistemas de puesta a tierra, para generar conciencia de la importancia de los SPT, no solo por cumplir con reglamentaciones, sino para la seguridad de las personas en contacto con los sistemas eléctricos y protección de equipos y estructuras. A través de este trabajo se proporciona al grupo de investigación una herramienta de desarrollo tecnológico para el cálculo de SPT, el cual difiere de los softwares existentes en la implementación de métodos adicionales de cálculo de resistencia y no solo los estipulados por el estándar ANSI/IEEE-80 en su versión 2013, teniendo en cuenta que el método como se calcular la resistencia de puesta a tierra no afecta los cálculos posteriores del estándar. Por esta razón el proyecto se encamina a presentar una aplicación que permita realizar el cálculo o mejoramiento del

SPT, parámetros para la equipotencialización de las mismas, todo esto mediante la utilización de una interfaz computacional que da los resultados para su posterior construcción, teniendo como lineamiento los algoritmos de cálculo en los estándares y fórmulas avaladas internacionalmente

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Implementar una interfaz gráfica de usuario que resuelva las diversas necesidades de los sistemas de puesta a tierra aplicada a varias especialidades de ingeniería y niveles de tensión, mediante el uso de una herramienta computacional.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir las características de los parámetros del SPT y las metodologías para la medición de resistividad del suelo y la RPT mediante un estado del arte que involucra los estándares IEEE.
- Analizar los métodos utilizados para el diseño, la interconexión y el mejoramiento de SPT mediante un estado del arte.
- Desarrollar la interfaz gráfica para el cálculo, interconexión y mejoramiento de SPT mediante el uso del software MATLAB.
- Validar la interfaz gráfica mediante la comparación de resultados utilizando el estándar ANSI/IEEE-80 en su versión 2013.

1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES

Dentro de las investigaciones realizadas en el campo de los SPT se debe resaltar (Malagón et al., 2015), hecha en la Universidad Industrial de Santander UIS, donde se presentan criterios para la compatibilidad electromagnética de los diferentes SPT existentes en un proyecto y que permite la minimización de los efectos producidos por impulsos electromagnéticos o en eventos de falla eléctrica. Adicionalmente se resaltan diferentes proyectos de grado y ponencias encaminados al diseño de SPT de diferentes proyectos como el diseño de puesta a tierra del laboratorio de alta tensión de la UIS, entre otros.

A nivel nacional se pueden destacar los trabajos realizados, donde se desarrolla una metodología de cálculo para un SPT de una subestación basados en el estándar IEEE 80-2000, tomando como prioridad el cumplimiento de las tensiones de paso y de contacto como lo determina el reglamento técnico de instalaciones eléctricas RETIE. En (González, 2005) se presentan fundamentos de los SPT en sistemas de potencia, mostrando conceptos, clasificaciones, llegando a los cálculos requeridos para garantizar la seguridad de las personas, equipos e instalaciones (Asdrúbal & Omar, 2003).

En el 2007 en el marco del simposio internacional sobre la calidad de la energía eléctrica se presentó una investigación que evalúa la equipotencialización del SPT y su

comportamiento en varios eventos de falla, realizando modelamientos en el software ATP/EMPT (Alternative Transient Program/Electromagnetic Transients Program) y teniendo conclusiones de interconexión entre distintos SPT mediante el uso de bobinas de choque (Solís, Prado, & Cano, 2007).

En el artículo (Gómez, Velilla, Moreno, & Valencia, 2006), se realiza un análisis mediante simulaciones de diferentes configuraciones de puestas a tierras (PAT), ante eventos de alta frecuencia aumentando la vida útil de los componentes eléctricos y disminuyendo las salidas de las líneas eléctricas de alimentación.

En el documento (Montaña, 2011) se presentan algunas recomendaciones para el diseño de SPT como lo es la longitud efectiva de los contrapesos en función de la resistividad del terreno, la ubicación de los bajantes de protección en el SPT, entre otros. Estas recomendaciones son parte esencial en los sistemas de apantallamiento, estas recomendaciones se fundamentan en resultados obtenidos mediante el análisis de diferentes configuraciones de electrodos de puesta a tierra.

En el ámbito internacional se pueden resaltar los estudios realizados en Argentina (Laurent et al., 2010) donde se estudió la unión o separación de electrodos en subestaciones aéreas, teniendo como conclusión que la interconexión de ellos atiende a los valores de resistividad del terreno y de la distancia de separación de los mismos. En (Suárez, 2004) se presentan diferentes metodologías para el cálculo de resistencias de puesta a tierra para la implementación en estructuras de media tensión en Cuba. En el 2015 en la ciudad de México se realizó (Basilio & Romero, 2015) una investigación basada en la corrosión, la cual afecta los electrodos de puesta a tierra, al ser elementos que están en continuo contacto con el suelo y sus múltiples componentes. (Güemes, Hernando, Rodríguez, & Ruiz, 2006) presentan un nuevo método de cálculo de SPT mediante el análisis matemático de elementos finitos tanto para mallas regulares como las no regulares, debido las configuraciones no regulares no son contempladas en los cálculos de la IEEE 80-2013.

2. MARCOS REFERENCIALES

2.1.1. MARCO TEÓRICO.

Dentro de los estándares internacionales se debe analizar el capítulo de Sistemas de Potencia y energía de la IEEE, en el cual se encuentra el paso a paso para el cálculo de RPT, tensiones de paso y de contacto soportables, gradiente de malla, tensiones de paso y de contacto reales al momento de una falla eléctrica. Dicho algoritmo de cálculo está diseñado primeramente para la conservación de la vida en seres vivos, aumentar el ciclo de vida útil de los equipos y la protección de la infraestructura de la subestación a ser diseñada (IEEE Power and Energy Society, 2013).

En la Figura 2-1 se observa un algoritmo para el diseño de SPT para subestaciones de alta y extra alta tensión, es de vital importancia en el paso 1 el conocimiento de los datos iniciales del proyecto como lo son:

- Área de construcción.
- Corriente de corto circuito.
- Resistividad aparente del terreno.
- Tiempo de despeje de falla de los equipos de protección.
- Relación X/R de las líneas circunscritas de la subestación.

Las tensiones admisibles se deben diseñar en el paso 3 con el criterio más desfavorable, el cual consiste al de una persona con peso corporal de 50 kg, lo anterior descrito es referente para saber cuál es el umbral de tensión que soporta el cuerpo humano al momento de producirse una falla en la subestación eléctrica.

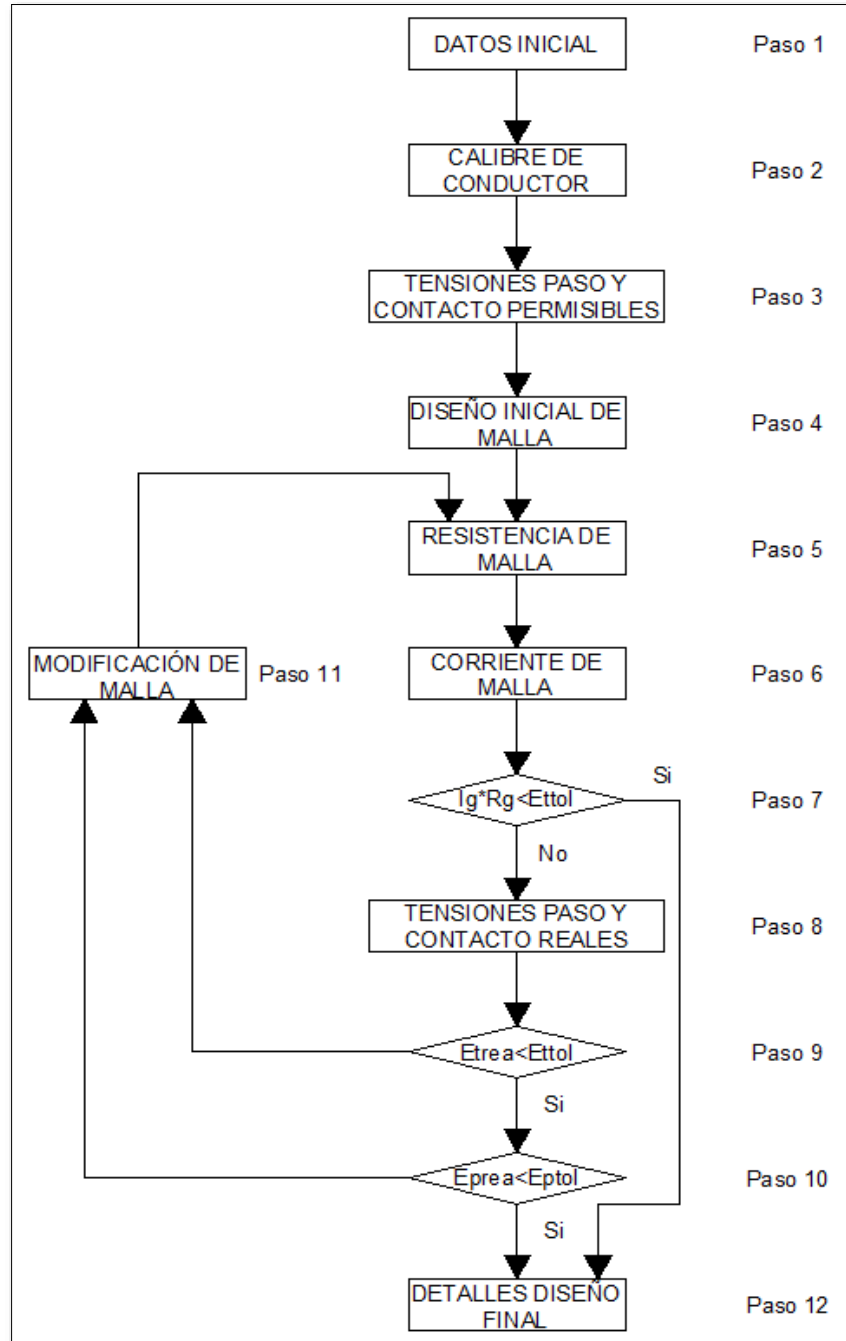
Se requiere un diseño inicial, el cual puede llegar a ser el diseño final o tener modificaciones, dependiendo de las comparaciones que se realizarán en pasos posteriores. Es importante tener en cuenta que el RETIE estipula una profundidad de enterramiento mínima de 0,75 metros con respecto al nivel de suelo terminado, con ello se pretende disminuir los potenciales de malla que se verán reflejados en la superficie del suelo al momento de una falla.

Al momento de obtener en el paso 7 el máximo potencial de malla GPR (por sus siglas en inglés ground potential rise) se debe comparar con las tensiones soportables, de ser estas últimas más grandes que el GPR el diseño queda aprobado debido a que las tensiones reales “de paso y de contacto” son inferiores a la máxima tensión de malla, caso contrario de no tener esta premisa se procede a calcular las mismas.

En los pasos 9 y 10 se calculan las tensiones de paso y contacto que se crean al momento de ocurrir una falla en la subestación; dichas tensiones están sujetas a varios factores como lo son calibre del conductor, profundidad de enterramiento de la malla, la resistencia de la malla, número de varillas, entre otros. Al obtener los valores de las tensiones reales se comparan con las tensiones soportables, teniendo como criterio de aprobación que las soportables sean mayores que las reales. En el caso que el diseño no

pueda generar protección a las personas, el algoritmo requiere de modificaciones de los pasos anteriores empezando con la reducción de la resistencia de puesta a tierra del diseño.

Figura 2-1. Diagrama de flujo diseño por IEEE 80-2013.



Fuente: (IEEE Power and Energy Society, 2013).

Es de gran importancia recalcar que un valor bajo de RPT es ideal para que las tensiones puedan ser controladas de forma más eficiente; en terrenos con resistividades altas “superiores a las 600 $\Omega.m$ ” dificultan poder obtener valores bajos de RPT en áreas pequeñas o bajos recursos económicos, debido a ello se sugiere la implementación de materiales con resistividades muy bajas, al recubrir los electrodos se aumenta artificialmente el área de contacto con el suelo, mejorando la disipación de la energía producida al momento de falla y disminuyendo el tiempo de drenaje de las mismas.

Siguiendo con los lineamientos de la práctica eléctrica después del diseño y construcción, se deben realizar mediciones de resistencia de puesta a tierra, tensiones de paso y contacto, verificando con ello que el valor de RPT esté por debajo de los valores establecidos por los reglamentos que apliquen y el control de tensiones de paso y contacto en los proyectos a ejecutar. En (IEEE Power and Energy Society, 2012) se presentan metodologías para la medición de resistividad aparente del terreno, resistencia de puesta a tierra, tensiones de paso y de contacto.

El valor de resistividad aparente del terreno depende de varios factores como la temperatura, compresión del material, humedad, tipo de material, en la Tabla 1 se muestran valores de resistividades típicas de distintos tipos de terreno. La norma estipula varios métodos para la medida de resistividad:

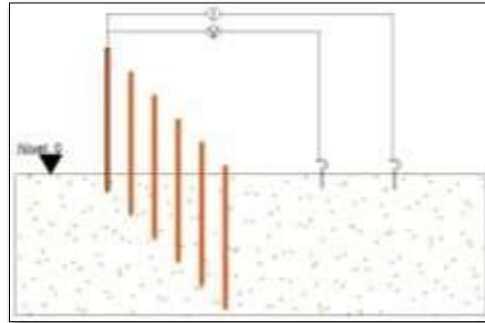
- Método de variación de profundidad expuesto en la Figura 2-2.
- Método de los 4 electrodos igualmente espaciados o método de Wenner expuesto en la Figura 2-3.
- Método de los 4 electrodos diferente distancias o método de Schlumberger expuesto en la Figura 2-4.

Tabla 1. Resistividades típicas del suelo.

Tipo de suelos	Rango de resistividades ($\Omega.m$)
Lama	5 – 100
Humus	10 – 150
Limo	20 – 100
Arcilla	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

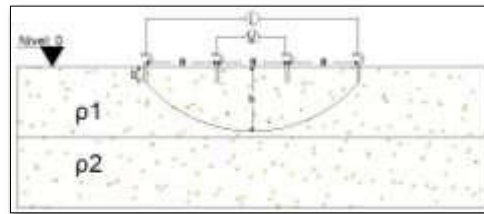
Fuente: (IEEE Power and Energy Society, 2013)

Figura 2-2. Método variación de profundidad.



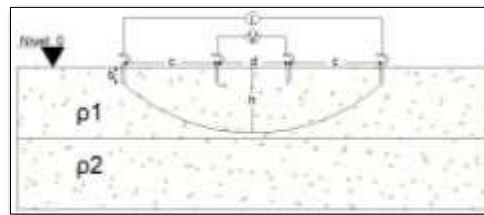
Fuente: Autor

Figura 2-3. Método de Wenner.



Fuente: Autor

Figura 2-4. Método de Schlumberger

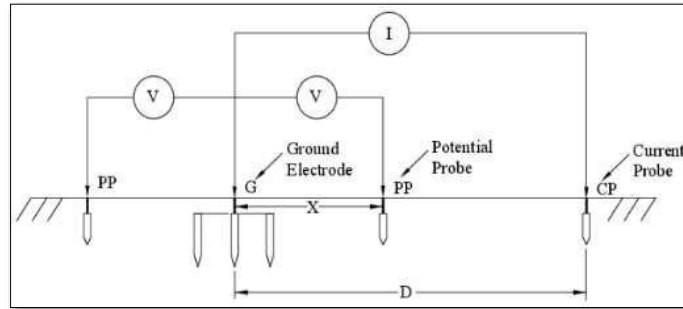


Fuente: Autor

En cuanto a la medición de resistencia de puesta a tierra el estándar recomienda los siguientes métodos:

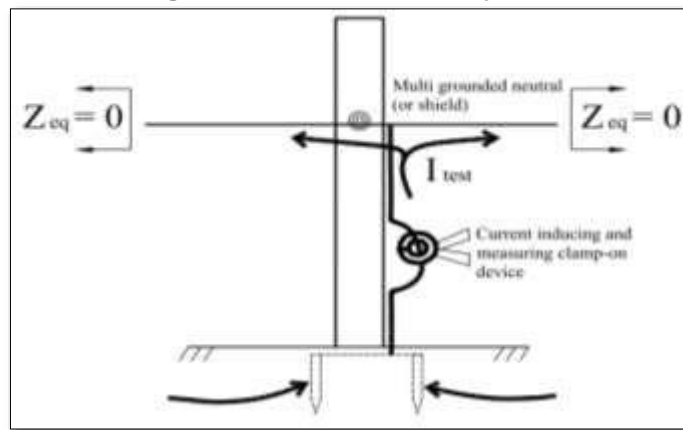
- Método de los dos puntos.
- Método de los tres puntos.
- Prueba de fallas por etapas.
- Método de caída de potencial presentado en la Figura 2-5.
- Método de resistencia por pinzas o método sin estacas.
- Mediciones de resistencia por FOP (Fall Of Potential), ver Figura 2-6.
- método de sujeción indicado en la Figura 2-7.
- Medición de impedancia de tierra por multímetro de puesta a tierra por computadora indicado en la Figura 2-8.

Figura 2-5. Método de la caída de potencial.



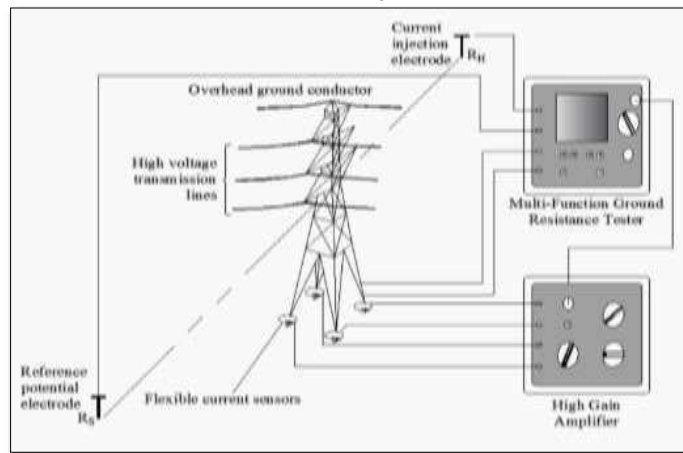
Fuente: (IEEE Power and Energy Society, 2012)

Figura 2-6. Método de sujeción.



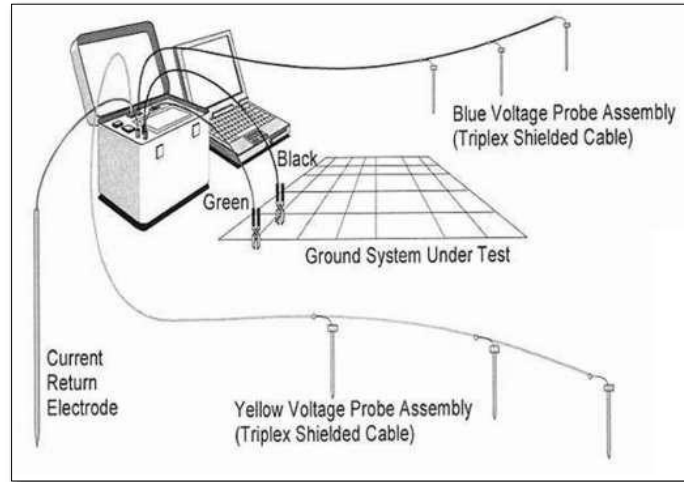
Fuente: (IEEE Power and Energy Society, 2012)

Figura 2-7. Método utilizando FOP y medida de corrientes de fuga.



Fuente: (IEEE Power and Energy Society, 2012)

Figura 2-8. Medida por multímetro de tierra por computadora.

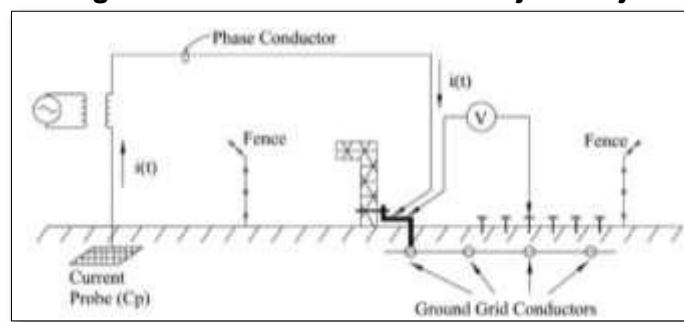


Fuente: (IEEE Power and Energy Society, 2012)

Adicionalmente a las medidas de resistencia de puesta a tierra y las de resistividad aparente del terreno, se deben de realizar medidas de tensiones de paso y contacto mediante los siguientes métodos.

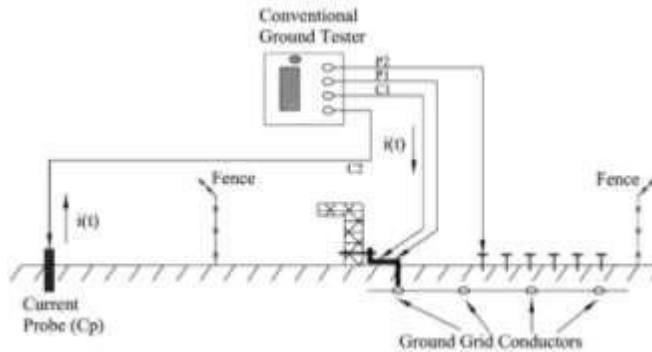
- Prueba de fallas por etapas.
- Prueba de inyección de corriente o falla de bajo voltaje indicado en la Figura 2-9.
- Medición con medidor de tierra convencional presentado en la Figura 2-10.
- Medición de voltajes táctiles y escalonados utilizando un multímetro de puesta a tierra basado en computadora presentado en la Figura 2-11.

Figura 2-9. Prueba de falla de bajo voltaje.



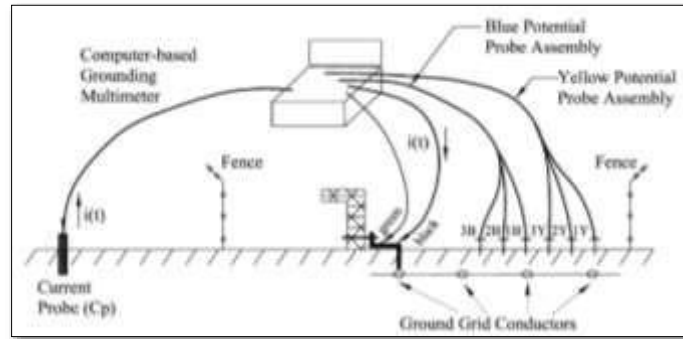
Fuente: (IEEE Power and Energy Society, 2012)

Figura 2-10. Medida tensión de contacto con medidores de tierras conversionales



Fuente: (IEEE Power and Energy Society, 2012)

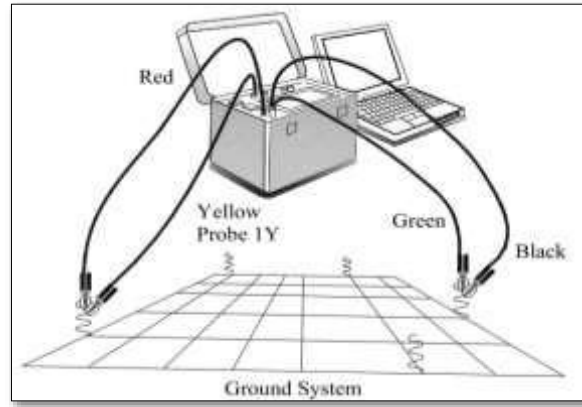
Figura 2-11. Medida de tensiones con multímetro de puesta a tierra por computadora.



Fuente: (IEEE Power and Energy Society, 2012)

En grandes subestaciones donde hay existencias de equipos electrónicos como lo son equipos de medida, equipos de control, comunicaciones, entre otros; dichos elementos son susceptibles a daños por voltajes existentes entre el neutro y la tierra de protección, al implementar las pruebas de RPT o las de tensiones de paso y de contacto basadas en la inyección de altas corrientes directamente en las mallas, se puede llegar a producir daños en los equipos electrónicos. Para evitar los daños mencionados es importante realizar la prueba de equipotencialización, como se muestra en la Figura 2-12; esto con el fin de establecer que todos los elementos estén sólidamente conectados al SPT por consiguiente que estarán a un mismo potencial al momento de realizar la inyección de corriente para proceder con las pruebas antes descritas.

Figura 2-12. Prueba de equipotencialización.



Fuente: (IEEE Power and Energy Society, 2012)

2.1.2. MARCO CONCEPTUAL

Encaminar un proyecto por el sector de las puestas a tierra es de cierta forma complejo, al margen de ser un tema que no se aborda con la suficiente profundidad en los currículos debido a los tiempos cortos de estudio, exceptuando los trabajos de investigación en niveles de postgrados, por consiguiente, el léxico utilizado para describir los elementos que se presentan en el cálculo de los SPT no son aún conocidos por las personas involucradas en el diseño, construcción o interventoría. A continuación, se presentan algunos de los términos más relevantes para comprender los procesos de diseño de puestas tierra expuestos en (IEEE Power and Energy Society, 2013).

Aumento del potencial de tierra (GPR “Ground Potential Rise”): El potencial eléctrico máximo que un electrodo de tierra, red o sistema podría alcanzar en relación con un punto de tierra distante que se supone que está en el potencial de la tierra remota.

Conexión equipotencial: Metodología de interconexión eléctrica de todas las superficies metálicas, formando una trayectoria conductiva que asegura el paso de posibles corrientes de falla.

Electrodo horizontal: Conjunto de electrodos típicamente previstos debajo de una línea eléctrica, cuya finalidad es la reducción de la resistencia de puesta a tierra medida en una malla de tierras.

Electrodo de tierra: Conductor enterrado en el terreno utilizado para la disipación de corrientes de falla en el sistema eléctrico, corrientes estáticas o de descargas atmosféricas.

Malla de tierra: Sistema de electrodos de tierra equipotencializados dispersos en un área específica en un patrón de diseño y enterrados en terreno.

Tensión de contacto: Diferencia de potencial que es percibida en el cuerpo al paso de una corriente desde un punto en contacto con una superficie metálica y al mismo tiempo estar ubicado en cercanía al punto de falla.

Tensión de paso: Diferencia de potencial presente entre dos puntos alejados una distancia de un paso (1 metro) al momento de una falla eléctrica.

Resistividad del terreno: Característica del suelo para oponerse al paso de una corriente, también denominada resistencia específica del terreno. También definida como la resistencia que ofrece un material al paso de una corriente en un cubo de dimensiones de un (1) metro.

Sistema de puesta a tierra: Conjunto de elementos sólidamente unidos eléctricamente que tienen la función de dar un camino de baja impedancia hacia el terreno y posterior disipación en el menor tiempo posible.

2.1.3. MARCO LEGAL

La legislación colombiana crea en el año 2004 el reglamento técnico de instalaciones eléctricas RETIE (UPME, 2013), en el cual se dan lineamientos para la protección de los seres vivos, de las instalaciones y de los componentes del sistema eléctrico. En la versión de 2013 el RETIE en el artículo 15 SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA, establece los requisitos para que toda instalación eléctrica pueda ser certificada por los organismos nacionales como una instalación segura, basándose en los cálculos expuestos por la IEEE 80-2013.

El RETIE determina las funciones a cumplir por el SPT las cuales son:

- Asegurar condiciones de protección a los seres vivos.
- Brindar un camino sólido para drenar en el menor tiempo posible las corrientes de falla.
- Dar referencia al sistema eléctrico.
- Permitir el despeje de falla de los equipos de protección.

Dentro de los requerimientos que se exigen a los SPT, se encuentran los siguientes:

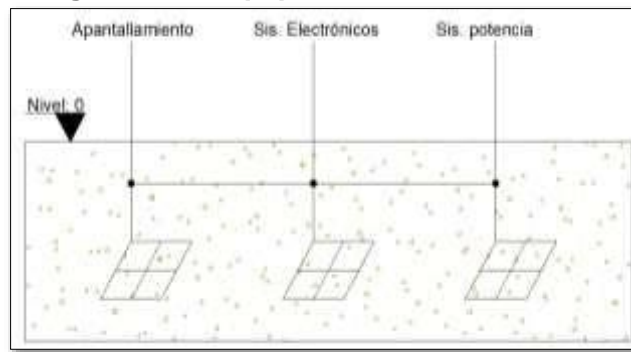
- Todo elemento metálico que no pertenezca al sistema eléctrico no debe ser utilizado como conductor de electricidad, este requerimiento no ha de exceptuar la conexión sólida de dichos elementos a la puesta a tierra, evitando con ello posibles corrientes inducidas por campos electromagnéticos.
- Todos los sistemas de puesta a tierra existentes en un mismo proyecto o edificación requieren ser conectados entre ellos, mediante conexión por encima o bajo el nivel del suelo según la Figura 2-13.
- En la Tabla 2, se estipulan valores máximos como referencia para los diferentes diseños a realizarse en el territorio nacional.

Tabla 2. Valores de referencia para resistencia de puesta a tierra

APLICACIÓN	VALORES MÁXIMOS DE RPT
Estructuras de líneas o redes con cable de guarda.	20 Ω
Subestaciones de alta o extra alta tensión.	1 Ω
Subestaciones de media tensión.	10 Ω
Sistemas de apantallamiento.	10 Ω
Conexión del neutro en baja tensión.	25 Ω
Equipos sensibles "electrónica"	10 Ω

Fuente: (UPME, 2013)

Figura 2-13. Equipotencialización de SPT.



Fuente: Autor

Es importante resaltar que un SPT debe controlar eficientemente tensiones de paso, contacto y transferidas. Un bajo valor de RPT es deseable al ser un factor que directamente influye en el máximo gradiente de tensión que se presenta en la malla, al momento de una falla eléctrica del sistema.

En la Tabla 3, el RETIE estipula los criterios de mantenimiento que se deben de realizar a un SPT y las pruebas que deben de realizarse ante de la puesta en funcionamiento así.

Tabla 3. Tiempos de mantenimientos en SPT

Nivel de tensión de la instalación	Inspección visual (años)	Inspección visual y mediciones (años)	Sistemas críticos Inspección visual y mediciones (años)
Baja	1	5	1
Media	3	6	1
Alta y Extra alta	2	4	1

Fuente: (UPME, 2013)

Como parte de las inspecciones finales es necesario realizar:

- Ensayos de equipotencialización.
- Medidas de resistencia de puesta a tierra.
- Medir corrientes espurias o de nodo común.

2.1.4. MARCO AMBIENTAL

La utilización de materiales de baja resistividad para aumentar artificialmente la sección transversal de los electrodos de puesta a tierra, es una práctica común para reducir la RPT calculada, realizar mejor control de tensiones de paso y contacto, adicionalmente realizar la disipación de energía de una forma más eficiente al tener mayor contacto con el terreno. En el capítulo 5 de (UNE, 2012) se estipulan los ensayos que se deben de realizar a los mejoradores de puesta a tierra. Dichos ensayos están encaminados a comprobar que los materiales no sean contaminantes al medio ambiente.

Las pruebas a realizarse son las siguientes:

- Ensayo de lixiviados de acuerdo a la norma EN 12457-2.
- Determinación de azufre de acuerdo a la norma ISO 4689-3, ISO 14869-1, y la instrumentación de análisis adaptada.
- Ensayo de resistividad del material bajo estándar ASTM G57-06 y ASTM 187.
- Ensayos de corrosión bajo estándar ASTM G59-97 y ASTM G102-89.

Es importante aclarar que estas pruebas buscan reducir el impacto de los mejoradores de puesta a tierra, al momento en que los componentes de dichos materiales migren a fuentes de agua subterráneas.

Se ha de resaltar también (Ontario, 2000) en la cual se estipulan elementos contaminantes y porcentajes máximos que deben de existir en los materiales utilizados en la industria, para así evitar contaminación del medio ambiente.

3. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

En el presente capítulo se presenta el desarrollo de los objetivos planteados con el objeto de crear una interfaz gráfica para el cálculo de SPT con la ayuda de un software de programación como lo es el MATLAB.

3.1. DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS DE SPT Y METODOLOGÍAS PARA LA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD Y RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA.

En la siguiente sección se realiza la descripción de uno de los principales parámetros implicados en un diseño de SPT, como lo es la resistividad, complementado con la explicación de las diferentes metodologías para la medida de la resistividad aparente del terreno y posterior medida de RPT al culminar la construcción de la puesta a tierra.

3.1.1. RESISTIVIDAD

La resistividad del suelo es la característica eléctrica de oponerse al paso de una corriente eléctrica, también conocida como resistividad aparente. De forma numérica se define como la resistencia ofrecida por un material al paso de una corriente en un cubo de 1 m x 1 m x 1 m, medida entre dos caras opuestas (García, 1999). La resistividad se denota por la letra griega ρ y su unidad de medida es el $\Omega \cdot m$ o el $\Omega \cdot cm$.

Este parámetro del terreno se ve afectado por varios factores como lo son la temperatura, estratigrafía del terreno, granulometría, estado higrométrico, composición del terreno, compresión entre otros. En textos se denotan valores de resistividad del terreno menores a 1 $\Omega \cdot m$ para agua de mar hasta 10⁹ $\Omega \cdot m$ en sectores de areniscas, como se muestra a continuación.

- Sales

La resistividad se ve fuertemente afectada por la cantidad de electrolitos existentes en el terreno, esto debido a la presencia de minerales y sales solubles; ver Figura 3-1.

- Tipo de terreno

Se pueden obtener diferentes tipos de resistividad dependiendo del tipo de material que se encuentre en el terreno como se observa en la Tabla 4.

- Granulometría

La capacidad del terreno de retener humedad gracias a su estructura o porosidad; al lograr mantener niveles altos de humedad los valores típicos de resistividad se ven reducidos.

- Estratigrafía

La tierra está formada por múltiples capas de diferentes tipos de terrenos y materiales acumulados durante millones de años, es por ello que se tendrán diferentes perfiles de

resistividad a medida que se profundiza en el terreno o se hacen varias muestras de suelo en una montaña.

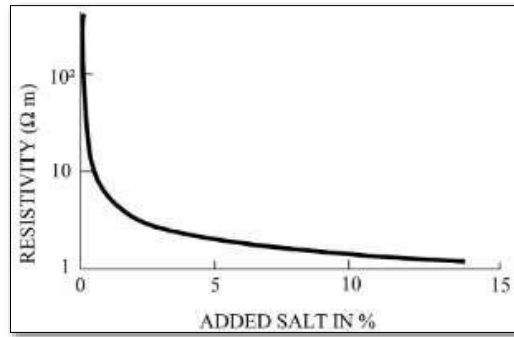
- Temperatura

La resistividad se ve influenciada con los cambios de temperatura, cuando sus valores son inferiores a los cero grados en donde se logra el punto de congelación del agua, se produce congelación de los minerales reduciendo el movimiento de los electrolitos en el terreno, ver Figura 3-2.

- Humedad

Al tener un delta de humedad superiores del 15% se tendrán cambios bruscos de la resistividad nativa del suelo, con la elevación de este parámetro se reduce la resistividad aparente del terreno; ver Figura 3-3.

Figura 3-1. Resistividad vs concentración de sales



Fuente: (Rüdenberg, 2013)

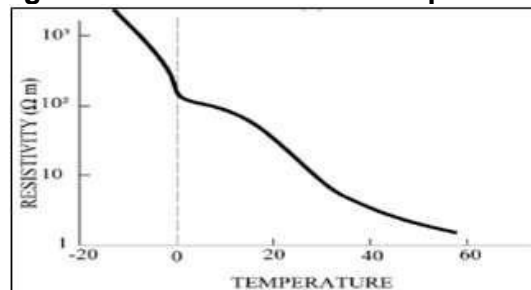
Tabla 4. Periodo geológico y formación

Resistividad del suelo (Ω.m)		Cuaternario	Cretáceo terciario Cuaternario	Carbonífero triásico	Cámbrico ordovícico devónico	Precámbrico y combinación con cámbrico
1	Agua de mar					
10	Inusualmente bajo		Limus arcilla caliza			
30	Muy bajo			Caliza diabasa esquisto piedra caliza		

Resistividad del suelo ($\Omega \cdot m$)		Cuaternario	Cretáceo terciario Cuaternario	Carbonífero triásico	Cámbrico ordovícico devónico	Precámbrico y combinación con cámbrico
100	Bajo			dolomita	Esquisto piedra caliza arenisca dolomita	
300	Medio					
1000	Alto					
3000	Muy alto	Arena gruesa y grava en capas superficiales				Arenisca cuarzo granito gneis
10000	Inusualmente alto					

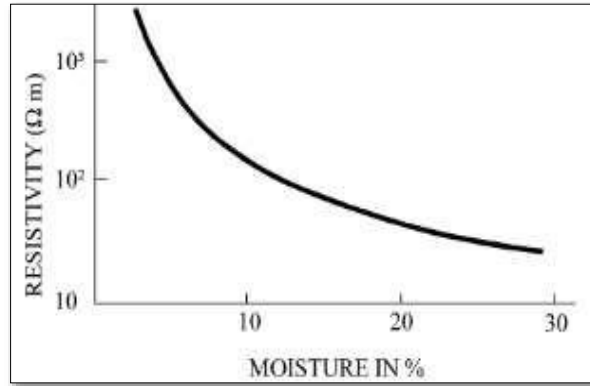
Fuente: (IEEE Power and Energy Society, 2012)

Figura 3-2. Resistividad vs temperatura.



Fuente: (Rdenberg, 2013)

Figura 3-3. Resistividad vs concentración de humedad.



Fuente: (Rdenberg, 2013)

3.1.1.1 MÉTODOS PARA MEDIR LA RESISTIVIDAD

Una de las principales bases para obtener un diseño que cumpla con los requerimientos de los proyectos es la resistividad, de ahí la importancia de realizar una correcta medida de este parámetro del terreno además de saber interpretar los datos obtenidos. A continuación, se presentan varias metodologías para obtener los valores de resistividad que se necesitan para el diseño de SPT.

a. Método de la variación de profundidad

Este método consiste en realizar la medida de RPT a un electrodo vertical, implementando la fórmula de cálculo de resistencia de un electrodo tipo varilla, despejando la resistividad de la fórmula e incluyendo los valores de resistencia medidos, se obtendrá un valor aproximado de resistividad del terreno.

Este método consiste en utilizar un electrodo tipo varilla, haciendo demarcaciones cada 10, 20 o 30 cm teniendo en cuenta que la longitud del electrodo sea suficiente para lograr obtener una caracterización del terreno. Se debe penetrar la varilla en el suelo tomando una lectura de resistencia por cada sección de varilla que se profundice, al finalizar se promedian los valores obtenidos y se calcula la resistividad mediante la ecuación (3-1) (IEEE Power and Energy Society, 2012).

$$\rho = \frac{2\pi LR}{\ln\left(\frac{4L}{b}\right) - 1} \quad (3-1)$$

Donde:

ρ : Resistividad aparente del terreno ($\Omega.m$).

L: Longitud del electrodo (m).

R: Resistencia medida (Ω).

b: Radio del electrodo (m).

b. Método de los cuatro electrodos

Posee una buena metodología para medir la resistividad aparente del terreno en capas profundas. Se ubican los cuatro electrodos auxiliares en línea recta con separaciones que difieren dependiendo de la variante a usar, se inyecta una corriente eléctrica entre los electrodos externos, al paso de la corriente se genera una diferencia de potencial entre los electrodos internos que se mide con un voltímetro, mediante ley de Ohm se obtiene una resistencia "R", $R=V/I$.

Método de WENNER

Los electrodos auxiliares se deben de espaciar a una distancia "a" entre ellos como se muestra en la Figura 2-3, el paso de la corriente no se realiza superficialmente en el suelo, en cambio hace un arco cuya mayor profundidad "h" es igual a la separación "a" entre electrodos, por lo anterior descrito se estipula que las medidas realizadas se producen a profundidad y se estipula las características de resistividad de capas profundas de terreno (IEEE Power and Energy Society, 2012). La resistividad del suelo está dada en la ecuación (3-2).

$$\rho = \frac{4\pi Ra}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (3-2)$$

Donde:

ρ : Resistividad aparente del terreno ($\Omega.m$).

R: Resistencia medida (Ω).

a: Distancia separación de electrodos auxiliares (m).

b: Distancia enterramiento electrodos auxiliares (m).

Es importante tener en cuenta, si la profundidad de enterramiento de los electrodos "b" es inferior a la distancia de espaciamiento "a" en un 10%, la ecuación (3-2)(3-3) se simplifica cuando $b=0$ quedando la siguiente expresión.

$$\rho = 2\pi Ra \quad (3-3)$$

Método de SCHLUMBERGER

El método de espaciamiento desigual entre los electrodos auxiliares de medida, a diferencia del método de Wenner los electrodos de tensión quedan fijos en una posición y se reubican los electrodos de corriente para aumentar la profundidad de las medidas en capas inferiores ver Figura 2-4. Esto se estipula como una de ventaja frente a medir por Wenner, solo se moverán dos electrodos de los cuatros utilizados.

La resistividad del terreno por el método de Schulmberger se estipula utilizando la ecuación (3-4), y la profundidad “h” de la medida mediante la ecuación (3-5) (IEEE Power and Energy Society, 2012).

$$\rho = \frac{\pi c(c + d)R}{d} \quad (3-4)$$

$$h = \frac{(2c + d)}{2} \quad (3-5)$$

En la actualidad los telurómetros que son los equipos para realizar la medida de resistividad del terreno, por sus componentes electrónicos de alta sensibilidad y precisión tienen programado el método de Wenner.

3.1.1.2 INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO.

La interpretación de los datos obtenidos en las medidas previas, es quizás el punto donde se ubicará la mayor dificultad, determinar el correcto modelo de resistividad del terreno asegura un mejor éxito al momento de diseñar un SPT. En esta sección se realizará análisis de los modelos de capas uniforme y del modelo de 2 capas.

a) Modelo de capas uniformes

Es posible la implementación de un modelo de capa uniforme cuando la variación de resistividades no es superada en un 30%, utilizando herramientas matemáticas como la ecuación (3-6) que muestra el cálculo de una resistividad promedio de un conjunto de datos obtenidos en las medidas previas.

$$\rho_a = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \dots + \rho_n}{n} \quad (3-6)$$

Donde:

$\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_n$: Resistividades aparentes medidas por los diferentes métodos vistos.
n: número de medidas de resistividad realizadas.

Otro mecanismo de cálculo para una resistividad homogénea del terreno es el método probabilístico de BOX-COX, esta metodología permite obtener un valor único de resistividad del suelo con una expectativa del 70% de no ser superado valor en cuestión. A continuación se determina una serie de pasos para el cálculo de unicapa de suelo (Orrego & Tabares, 2007):

- De existir varias rutas de mediciones se deben promediar los valores agrupándolas teniendo en común la profundidad de la medida entre ellas.
- Se tabula los valores de resistividad hallados anteriormente.
- Se debe calcular los logaritmos naturales de las resistividades por capa de suelo.

$$x_i = \ln \rho_i \quad (3-7)$$

- Mediante el uso de la ecuación (3-8) se estipula una resistividad promedio.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} x_i}{n} \quad (3-8)$$

- Se debe calcular la ecuación (3-9).

$$(x_i - \bar{x})^2 \quad (3-9)$$

- Calcular la desviación estándar mediante la ecuación (3-10)

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (3-10)$$

- Para una probabilidad del 70% se toma un valor de 0.524400513 para Z, este valor se obtiene de interpolar los valores de 0.6985 y 0.7019 en la tabla de distribución normal que se muestra en la Tabla 5 (IEEE Power and Energy Society, 2013).
- Por último, al implementar los valores obtenidos anteriormente se incluyen en la ecuación (3-11).

$$\rho_i = e^{S*Z+\bar{x}} \quad (3-11)$$

b) Modelo de dos capas

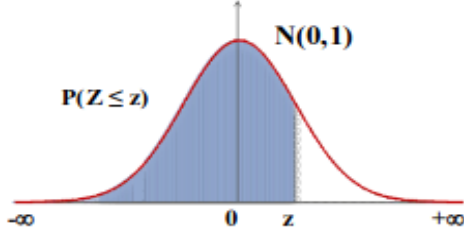
Para estructurar un modelo de dos capas que satisfaga las necesidades de un correcto dato de resistividad del terreno. El método gráfico de Sunde, es ideal para realizar un análisis de las medidas realizadas por los métodos de los 4 electrodos. A continuación, se describe el paso a paso para determinar un modelo bicapa.

Trazar una gráfica resistividad en el eje vertical versus separación de los electrodos en el eje horizontal, con las medidas de resistividad realizadas previamente, ver Tabla 5.

- Determinar dos grupos de resistividades (ρ_1 y ρ_2), haciendo una revisión visual de la gráfica hecha antes.
- Realizar la división de ρ_2/ρ_1 , con el valor obtenido seleccionar una de las curvas en la Figura 3-5, de no existir una curva que satisfaga el valor obtenido, dibujar o interpolar una nueva curva.
- Seleccione un valor de ρ_a/ρ_1 en el eje y de la Figura 3-5.
- Tomar el valor de a/h que corresponda con el punto de corte del valor ρ_a/ρ_1 con la curva seleccionada.
- Calcular ρ_a multiplicando ρ_1 con el valor ρ_a/ρ_1 .

Tabla 5. Función distribución normal

FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN NORMAL N(0,1)



z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5753
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
0,6	0,7257	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
0,7	0,7580	0,7611	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
1,0	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,9015
1,3	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,9370	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441
1,6	0,9452	0,9463	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545
1,7	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633
1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,9750	0,9756	0,9761	0,9767
2,0	0,9772	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
2,1	0,9821	0,9826	0,9830	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,9850	0,9854	0,9857
2,2	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,9890
2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916
2,4	0,9918	0,9920	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
2,5	0,9938	0,9940	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
2,6	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,9960	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
2,7	0,99653	0,99664	0,99674	0,99683	0,99693	0,99702	0,99711	0,99720	0,99728	0,99736
2,8	0,99744	0,99752	0,99760	0,99767	0,99774	0,99781	0,99788	0,99795	0,99801	0,99807
2,9	0,99813	0,99819	0,99825	0,99831	0,99836	0,99841	0,99846	0,99851	0,99856	0,99861
3,0	0,99865	0,99869	0,99874	0,99878	0,99882	0,99886	0,99889	0,99893	0,99896	0,99900
3,1	0,99903	0,99906	0,99910	0,99913	0,99916	0,99918	0,99921	0,99924	0,99926	0,99929
3,2	0,99931	0,99934	0,99936	0,99938	0,99940	0,99942	0,99944	0,99946	0,99948	0,99950
3,3	0,99952	0,99953	0,99955	0,99957	0,99958	0,99960	0,99961	0,99962	0,99964	0,99965
3,4	0,99966	0,99968	0,99969	0,99970	0,99971	0,99972	0,99973	0,99974	0,99975	0,99976
3,5	0,99977	0,99978	0,99978	0,99979	0,99980	0,99981	0,99981	0,99982	0,99983	0,99983
3,6	0,99984	0,99985	0,99985	0,99986	0,99986	0,99987	0,99987	0,99987	0,99988	0,99988
3,7	0,99989	0,99990	0,99990	0,99990	0,99991	0,99991	0,99992	0,99992	0,99992	0,99992
3,8	0,99993	0,99993	0,99993	0,99994	0,99994	0,99994	0,99994	0,99995	0,99995	0,99995
3,9	0,99995	0,99995	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99997	0,99997
4,0	0,99997	0,99997	0,99997	0,99997	0,99997	0,99997	0,99998	0,99998	0,99998	0,99998

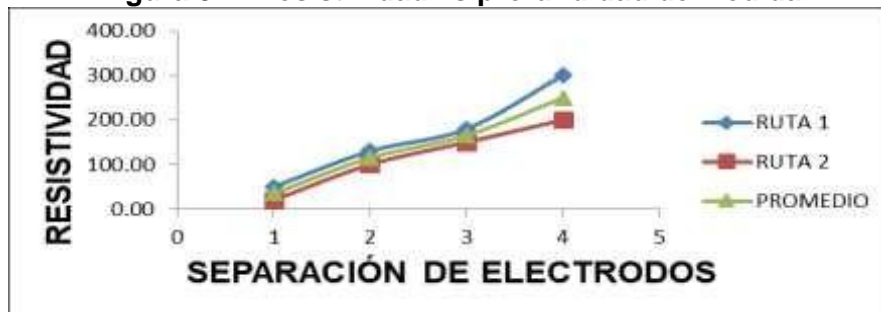
Fuente: (Ematecs, 2020)

Identificar la profundidad de la capa pa ubicando el valor de dicha capa, en la Figura 3-4, se realiza un corte en la curva de resistividad y ubicamos el valor de la profundidad (a).

- Calcular h mediante la ecuación (3-12).

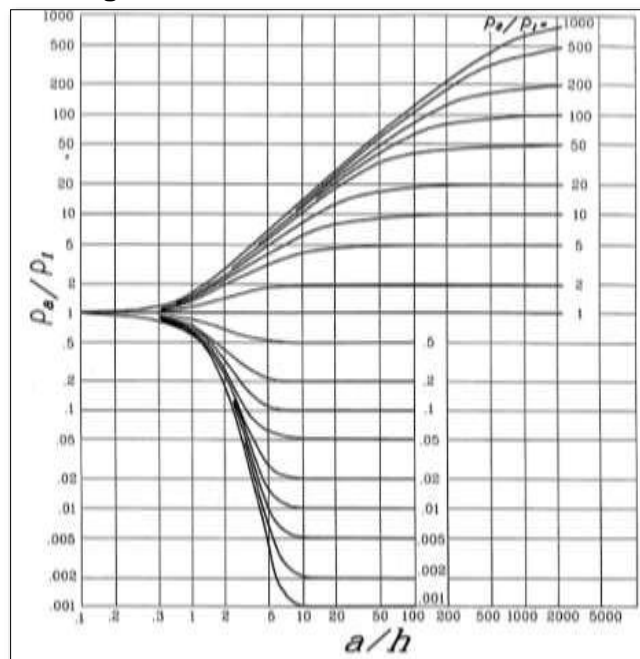
$$h = \frac{a}{a/h} \quad (3-12)$$

Figura 3-4. Resistividad vs profundidad de medida



Fuente: Autor.

Figura 3-5. Gráfica método de Sunde.



Fuente: (IEEE Power and Energy Society, 2013)

3.1.2. MÉTODOS PARA MEDIR LA RESISTENCIA

Posterior al diseño y construcción de los sistemas de puesta a tierra se realiza la medida de RPT para determinar si el valor obtenido se encuentra dentro de los requeridos por los lineamientos del RETIE. A continuación, se presentan diversos métodos para realizar la medida de resistencia en SPT.

3.1.2.1 MÉTODO DE LOS DOS PUNTOS

Para este método se debe disponer de una puesta a tierra en serie al SPT que es sujeto a medida, la puesta a tierra auxiliar debe tener un valor de resistencia muy bajo para ser despreciado al momento de realizar la medida de resistencia a la puesta a tierra a medir. Este método sirve para medidas no tan precisas en donde se requiere verificar la aprobación o rechazo de la puesta a tierra, este método es proclive a grandes errores en terrenos de alta resistividad en donde se dificulta poder tener una puesta a tierra auxiliar de bajo valor de resistencia (IEEE Power and Energy Society, 2012).

3.1.2.2 MÉTODO DE LOS TRES PUNTOS

Realizar este procedimiento de medida involucra el uso de 2 puestas a tierras auxiliares las cuales deben de ser de baja resistencia, dichas tierras auxiliares se denominarán r_2 y r_3 y el SPT a ser medido se denomina r_1 . Se mide la resistencia en serie de cada par de resistencias denominándolas r_{12} , r_{13} , r_{23} .

Donde:

$$R_{12} = r_1 + r_2, \text{ etc.}$$

Resolviendo un sistema de ecuaciones, se obtiene:

$$r_1 = \frac{r_{12} - r_{23} + r_{13}}{2} \quad (3-13)$$

Al igual al método anterior se presentan errores al momento de tener una impedancia mayor en las puestas a tierra auxiliares (IEEE Power and Energy Society, 2012).

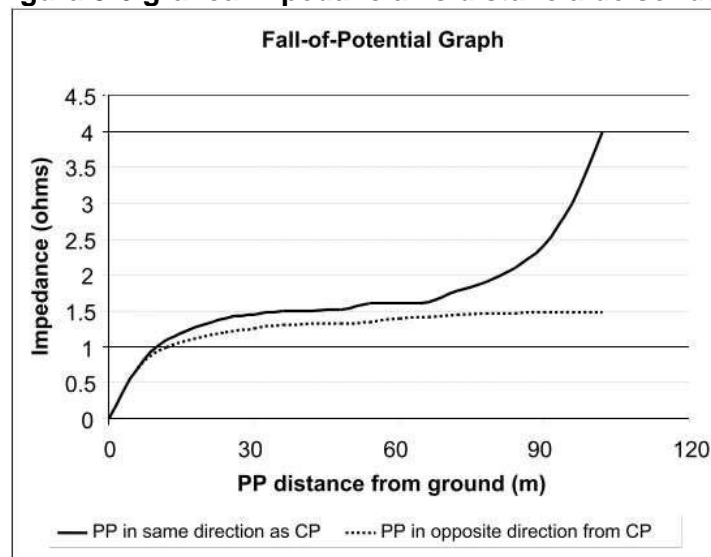
3.1.2.3 MÉTODO DE LA CAIDA DE POTENCIAL

El método de caída de potencial consiste en la inyección de una corriente desde el electrodo a prueba hasta un electrodo auxiliar de corriente, que debe estar ubicado a una distancia cinco (5) veces la distancia mayor del electrodo a prueba. En la prueba

interviene un electrodo auxiliar de tensión el cual sirve para mediar la caída de tensión entre él y la puesta a tierra.

Se debe realizar medidas progresivas reubicando el electrodo auxiliar de tensión desde la puesta a tierra bajo estudio hasta el electrodo auxiliar de corriente. Cuando el electrodo de voltaje se encuentra cercano a la puesta a tierra se presentan valores de resistencia cercanos a cero (0) y valores con tendencia a infinito al acercarse al electrodo auxiliar de corriente. En la Figura 3-6 se muestra el resultado de graficar los diferentes valores de resistencia medidos frente contra la distancia de separación del electrodo de voltaje. Este procedimiento se realiza para corroborar la ausencia de influencia tanto del electrodo auxiliar de corriente como del electrodo a prueba.

Figura 3-6 grafica impedancia vs distancia de sondeo.



Fuente: (IEEE Power and Energy Society, 2012)

El valor de RPT para la prueba se determina en la parte llana de la gráfica, ubicándose aproximadamente al 62% de la distancia total de recorrido entre la puesta a tierra y el electrodo auxiliar de corriente. Un correcto procedimiento implica la ubicación el punto de inyección de corriente en la puesta a tierra a medir en su centro eléctrico, es decir, el punto en donde la dispersión de corriente será homogénea en la misma (IEEE Power and Energy Society, 2012).

3.1.2.4 MÉTODO DE SUJECIÓN O SIN ESTACAS.

El método consiste en el uso de pinzas que inducen una tensión con frecuencias de 1 kHz y 3,4 kHz en puestas a tierras conectadas mediante el bajante del guarda o el neutro. La tensión inducida hace que una corriente de testeo fluya por el bajante y retornando por los electrodos circundantes, midiendo la relación voltaje-corriente. Este método parte de la

premisa que la impedancia del conductor que equipotencializa las puestas a tierra sea de un valor menor al de la puesta a tierra a medir.

A pesar de ser un método utilizado frecuentemente, presenta varias desventajas como lo son la necesidad de la baja impedancia del sistema en paralelo a la tierra a ser medida, inclusión de grandes errores a medida que se encuentran reactancias inductivas en los conductores de conexión, los aumentos de resistencias de contacto debido a corrosión en los puntos de conexión aumenta la resistencia de la medida, el método no es aplicable para puestas a tierra como subestaciones que tienen múltiples conexiones y se puede ver afectada por ruidos en el sistema.

3.2. ANÁLISIS DE MÉTODOS DE DISEÑO, INTERCONEXIÓN Y MEJORAMIENTO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.

A continuación, se exponen las diferentes metodologías para el cálculo de resistencia de puesta a tierra “RPT”, de los distintos tipos de electrodos de puesta a tierra existentes. Debido a que algunas configuraciones de sistemas de puestas a tierra “SPT” tienen como función principal no solo la disipación de energía en el suelo, como por ejemplo las configuraciones radiales puestas a tierra en torres de comunicación, dichas topologías tienen como utilidad dar referencia a las ondas de radio frecuencia. Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, el software exhibe el valor de RPT para las diferentes configuraciones existentes.

Para efectos prácticos del presente documento se normalizan los diferentes componentes que intervienen en las ecuaciones a una misma nomenclatura, facilitando la lectura del documento.

3.2.1. RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

La finalidad de un sistema de puesta a tierra es el drenar al terreno en el menor tiempo la energía producida en un evento de falla eléctrica, eventos atmosféricos o de energía estática. En Colombia el reglamento técnico de instalaciones eléctricas RETIE, determina unos valores de referencia para diseño y construcción de SPT dependiendo de la implementación en el sector eléctrico, ver Tabla 2.

Existen diversos tipos de electrodos para puestas a tierra en el mercado como lo son las placas de cobre, varillas o electrodos verticales con sus diversas configuraciones de varillas en paralelo, cable o también denominados electrodos horizontales con los cuales se tienen múltiples configuraciones como la estrella, Electrodo horizontal, mallas entre otros. Con esta variedad de electrodos existentes, se presenta un grupo de fórmulas que ayuda en el cálculo de RPT al implementar dichos electrodos.

En el capítulo 15 del RETIE se estipula los requerimientos mínimos de materiales, espesores o recubrimiento para electrodos de puesta a tierra, ver Tabla 6.

Tabla 6. Requisitos para electrodos de puesta a tierra.

Tipo de electrodo	Materiales	Dimensiones mínimas			
		Diámetro (mm)	Área mm ²	Espesor mm	Recubrimiento µm
Varilla	Cobre	12.7			
	Aleación de cobre	12.7			
	Acero inoxidable	15			
	Acero galvanizado en caliente	16			70
	Acero con recubrimiento electrodepositado de cobre	14			250
	Acero con recubrimiento total de cobre	15			2000
Tubo	Cobre	20		2	
	Acero inoxidable	25		2	
	Acero galvanizado en caliente	25		2	55
Fleje o cinta sólida	Cobre		50	2	
	Acero inoxidable		100	3	
	Cobre cincado		50	2	40
Cable trenzado	Cobre o cobre estañado	1.8 para cada hilo	50		
	Acero galvanizado en caliente	1.8 para cada hilo	70		
Alambre redondo	Cobre	8	50		
	Acero galvanizado	10	78.5		70
	Acero inoxidable	10			
	Acero recubierto de cobre	10			250
Placa sólida	Cobre		250000	1.5	
	Acero inoxidable		360000	6	

Fuente: (UPME, 2013)

3.2.2. CÁLCULO DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

1 Placa de cobre.

Elementos metálicos normalmente de cobre o de acero, las placas de acero son de un espesor de 12 mm, las de cobre entre 1.6 y 3 mm de espesor. Son usadas como plataformas equipotenciales para graduar los potenciales (Procobre, 2012); en la ecuación (3-14) se muestran los datos necesarios para el cálculo de RPT para placa de cobre, ver Figura 3-7, teniendo en cuenta la recomendación de ser enterrada la placa de forma vertical, aumentando así el contacto del electrodo con el terreno (DEHN, 2014).

$$R_G = \frac{\rho}{2,25.L} \text{ ó } \frac{1,6\rho}{P} \quad (3-14)$$

Donde:

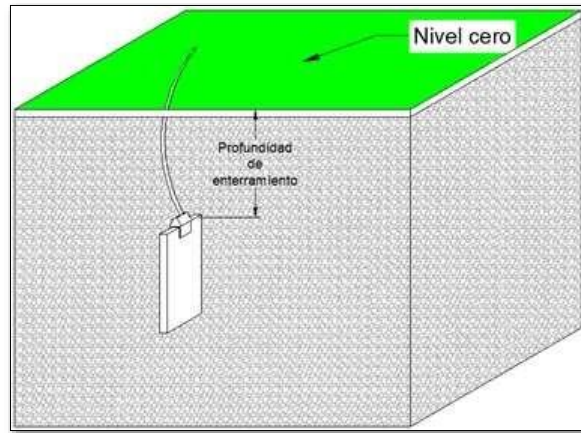
R_G: Resistencia de puesta a tierra (Ω).

ρ: Resistividad del terreno (Ω.m).

L: Longitud del lado de la placa cuadrada, $L = \sqrt{b \cdot c}$, donde b y c son los lados del rectángulo (m).

P: Perímetro de la placa (m).

Figura 3-7. Placa de cobre enterrada.

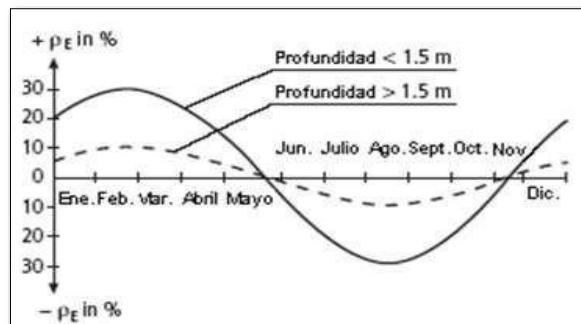


Fuente: Autor.

2 Electrodo verticales.

La implementación de electrodos verticales se estipula como una de las prácticas más frecuentes en la construcción de sistemas de puesta a tierra, debido a su eficiencia con respecto al área utilizada. En países que cuentan con estaciones, cuando se encuentran en invierno donde las capas superiores se humedecen y congelan aumentando considerablemente la resistividad del terreno lo anterior denominado variaciones estacionarias (Duche & Miñan, 2013), los electrodos verticales se utilizan para entrar en contacto con capas profundas de terreno, debido a que los electrodos horizontales se encuentran aislados eléctricamente por motivo a la congelación ver Figura 3-8.

Figura 3-8. Variación de resistividad debido a las estaciones.

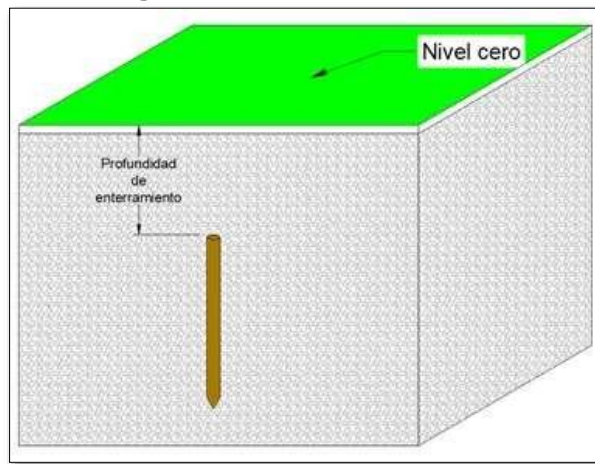


Fuente: (Short, 2014).

Dentro de las desventajas en el uso de las varillas se estipula por el paso por varias capas de diferentes resistividades de terreno, produciendo posible corrosión a causa del efecto

Evans (también llamado aireación diferencial). Las diferentes capas del terreno tienen diferente permeabilidad del aire y la parte del conductor que se encuentre en la zona menos oxigenada se convertirá en el ánodo (ILCE, 2007). Otra desventaja radica en el momento de hincar el electrodo en el terreno, al no tener la posibilidad de encontrarse en capas profundas con sedimentaciones rocosas las cuales no permiten la instalación del mismo, produciendo con ello la reducción de la cantidad de material enterrado, con respecto a lo estipulado en diseño previo.

Figura 3-9. Electrodo vertical.



Fuente: Autor.

Las siguientes son las ecuaciones para calcular la RPT para electrodos verticales.

Ecuación de H. B. Dwight (Dwight, 1936).

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi L_v} \left(\ln \left(\frac{4L_v}{r_v} \right) - 1 \right) \quad (3-15)$$

Ecuación de R. Rüdénberg (Rdenberg, 2013).

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi L_v} \ln \left(\frac{2L_v}{r_v} \right) \quad (3-16)$$

Ecuación de Sankosha (Sankosha, 2006).

$$R_G = \frac{\rho}{2.73L_v} \log \left(\frac{2L_v}{r_v} \right) \quad (3-17)$$

Para diferentes arreglos donde se utilicen más de un electrodo vertical se puede calcular la resistencia R_G de dicho arreglo mediante la ecuación (3-18), es de gran importancia resaltar que el paralelismo entre más de una varilla no es lineal como se observa con resistencias de materiales, por lo mencionado anteriormente se presenta en la Figura 3-10 una gráfica porcentual de la efectividad del paralelismo de electrodos verticales.

$$R_t = \frac{R_g}{n_v} (2 - e^{-0.17(n_v-1)}) \quad (3-18)$$

Donde:

R_t : Resistencia en paralelo de n número de varillas (Ω).

R_g : Resistencia de puesta a tierra (Ω).

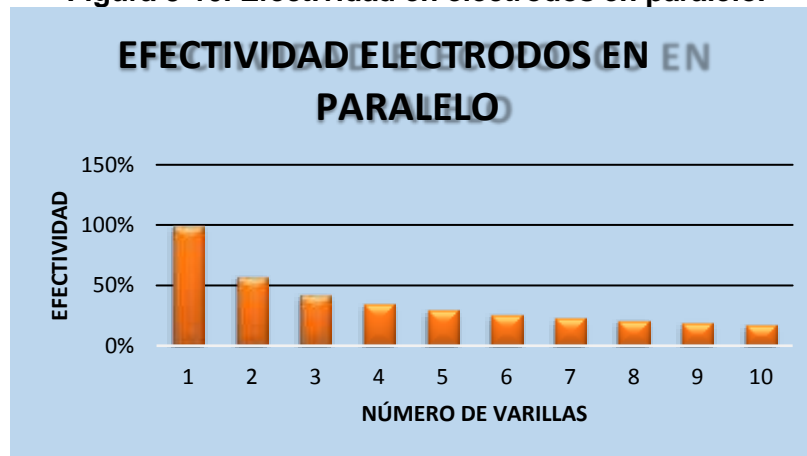
ρ : Resistividad del terreno ($\Omega.m$).

L_v : Longitud de la varilla (m).

r_v : Radio de la varilla (m).

n_v : Número de varillas.

Figura 3-10. Efectividad en electrodos en paralelo.



Fuente: Autor.

3 Electrodo horizontales.

Los electrodos horizontales son, básicamente cable de material metálico enterrado aproximadamente a una misma profundidad, en Colombia la profundidad mínima de enterramiento de los electrodos es de 0,75 m con respecto al nivel cero del suelo terminado, ver Figura 3-11. La implementación de electrodos de forma horizontal disminuye los tiempos de construcción, las configuraciones realizadas con cable son flexibles de modificaciones en construcción.

Como se estipuló anteriormente la configuración de electrodos horizontales tienen una desventaja en países con estaciones, por motivo de la congelación de las capas superiores del terreno en invierno. Al momento de disponer de una distancia y la configuración ideal a ser implementada, se debe calcular la longitud efectiva del electrodo horizontal como se observa en la ecuación (3-19), esto debido a que el tiempo de elevación del frente de onda del rayo es del orden de μs y a mayor longitud de cable aumenta la impedancia del mismo, disminuyendo la disipación de la energía del rayo. De no ser disipada efectivamente la energía de un rayo en una estructura puede producir

flameo inverso (*flashover*) en torres de transmisión eléctrica (Chisholm, Petrache, & Bologna, 2009).

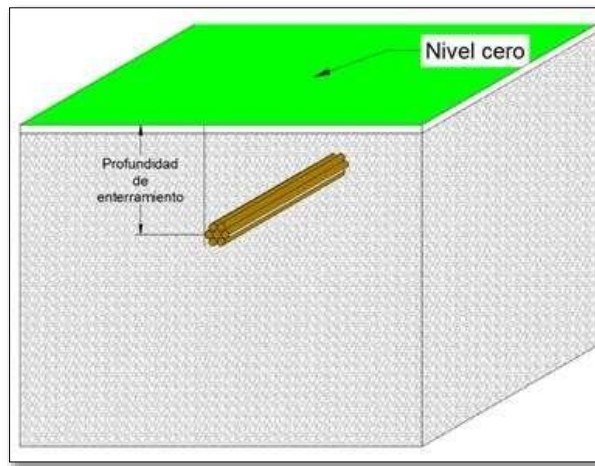
$$L_{efec} = 0.28\sqrt{\hat{i} * \rho} \quad (3-19)$$

L_{efec} : Longitud efectiva del electrodo (m)

\hat{i} : Valor pico de corriente del rayo (kA).

ρ : Resistividad del terreno ($\Omega.m$).

Figura 3-11. Profundidad de enterramiento electrodo horizontal.



Fuente: Autor.

Las ecuaciones que se implementan para el cálculo de RPT mediante el uso de electrodos horizontales con longitud total L (m), radio r (m) y enterrado a una profundidad H (m), se relacionan a continuación.

- **Conductor horizontal.**

Ecuación de H.B. Dwight (Dwight, 1936).

$$R_G = \frac{\rho}{4\pi l} \left(\ln\left(\frac{4l}{r}\right) + \ln\left(\frac{4l}{h}\right) - 2 + \frac{h}{2l} - \frac{h^2}{16l^2} + \frac{h^4}{512l^4} \right) \quad (3-20)$$

$$h = 2H ; l = L/2 \quad (3-21)$$

Simplificando términos queda la siguiente ecuación:

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln\left(\frac{2L}{r}\right) + \ln\left(\frac{L}{H}\right) - 2 + \frac{2H}{L} - \frac{H^2}{L^2} + \frac{H^4}{2L^4} \right) \quad (3-22)$$

Ecuación de NMX-J-549-ANCE-2005 (Normas ANCE, 2005).

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi B} \left(\ln \left(\frac{B^2}{1.85H2r} \right) \right) \quad (3-23)$$

Ecuación de Sankosha (Sankosha, 2006).

$$R_G = \frac{\rho}{2.73B} \left(\text{Log} \left(\frac{B^2}{2Hr} \right) \right) \quad (3-24)$$

- **Conductor horizontal en L.**

Ecuación de H.B. Dwight (Dwight, 1936)c.

$$R_G = \frac{\rho}{4\pi l} \left(\ln \left(\frac{l}{r} \right) + \ln \left(\frac{2l}{h} \right) - 0.2373 + \frac{0.2146h}{l} + \frac{0.1035h^2}{l^2} - \frac{0.0424h^4}{l^4} \right) \quad (3-25)$$

$$h = 2H ; l = L/2 \quad (3-26)$$

Simplificando términos queda la siguiente ecuación:

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \left(\frac{L}{2r} \right) + \ln \left(\frac{L}{4H} \right) - 0.2373 + \frac{0.8584H}{L} + \frac{1.656H^2}{L^2} - \frac{10.8544H^4}{L^4} \right) \quad (3-27)$$

Simplificando términos queda la siguiente expresión:

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \left(\frac{L}{r} \right) + \ln \left(\frac{L}{2H} \right) - 0.2373 + \frac{0.8584H}{L} + \frac{1.656H^2}{L^2} - \frac{10.8544H^4}{L^4} \right) \quad (3-28)$$

Ecuación de NMX-J-549-ANCE-2005 (Normas ANCE, 2005).

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi B} \left(\ln \left(\frac{B^2}{1.27H2r} \right) \right) \quad (3-29)$$

- **Conductor horizontal en estrella de tres puntas.**

Ecuación de H.B. Dwight (Dwight, 1936).

$$R_G = \frac{\rho}{6\pi l} \left(\ln \left(\frac{l}{r} \right) + \ln \left(\frac{2l}{h} \right) + 1.071 - \frac{0.209h}{l} + \frac{0.238h^3}{l^3} - \frac{0.054h^4}{l^4} \right) \quad (3-30)$$

$$h = 2H ; l = L/3 \quad (3-31)$$

Al simplificar términos queda de la siguiente manera:

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln\left(\frac{2L}{3r}\right) + \ln\left(\frac{L}{3H}\right) + 1.071 - \frac{1.254H}{L} + \frac{51.408H^3}{L^3} - \frac{69.984H^4}{L^4} \right) \quad (3-32)$$

Ecuación de NMX-J-549-ANCE-2005 (Normas ANCE, 2005).

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi B} \left(\ln\left(\frac{B^2}{0.767H2r}\right) \right) \quad (3-33)$$

- **Conductor horizontal en estrella de cuatro puntas.**

Ecuación de H.B. Dwight (Dwight, 1936).

$$R_G = \frac{\rho}{8\pi l} \left(\ln\left(\frac{2}{r}\right) + \ln\left(\frac{2l}{h}\right) + 2.912 - \frac{1.071h}{l} + \frac{0.645h^3}{l^3} - \frac{0.145h^4}{l^4} \right) \quad (3-34)$$

$$h = 2H ; l = L/4 \quad (3-35)$$

Ecuación de NMX-J-549-ANCE-2005 (Normas ANCE, 2005).

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi B} \left(\ln\left(\frac{B^2}{0.217H2r}\right) \right) \quad (3-36)$$

- **Conductor horizontal en estrella de seis puntas.**

Ecuación de H.B. Dwight (Dwight, 1936).

$$R_G = \frac{\rho}{12\pi l} \left(\ln\left(\frac{2}{r}\right) + \ln\left(\frac{2l}{h}\right) + 6.851 - \frac{3.128h}{l} + \frac{1.758h^3}{l^3} - \frac{0.409h^4}{l^4} \right) \quad (3-37)$$

$$h = 2H ; l = L/6 \quad (3-38)$$

Al simplificar queda la siguiente expresión:

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln\left(\frac{L}{3r}\right) + \ln\left(\frac{L}{6H}\right) + 6.851 - \frac{37.536H}{L} + \frac{3037.824H^3}{L^3} - \frac{8481.024H^4}{L^4} \right) \quad (3-39)$$

Ecuación de NMX-J-549-ANCE-2005 (Normas ANCE, 2005).

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi B} \left(\ln \left(\frac{B^2}{9.42H2r} \right) \right) \quad (3-40)$$

- **Conductor horizontal en estrella de ocho puntas.**

Ecuación de H.B. Dwight (Dwight, 1936).

$$R_G = \frac{\rho}{16\pi l} \left(\ln \left(\frac{2}{r} \right) + \ln \left(\frac{2l}{h} \right) + 10.98 - \frac{5.51h}{l} + \frac{3.26h^3}{l^3} - \frac{1.17h^4}{l^4} \right) \quad (3-41)$$

$$h = 2H ; l = L/8 \quad (3-42)$$

Simplificando términos queda la siguiente ecuación:

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \left(\frac{L}{4r} \right) + \ln \left(\frac{L}{8H} \right) + 10.98 - \frac{5.51H}{L} + \frac{13352.96H^3}{L^3} - \frac{76677.12H^4}{L^4} \right) \quad (3-43)$$

Ecuación de NMX-J-549-ANCE-2005 (Normas ANCE, 2005).

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi B} \left(\ln \left(\frac{B^2}{2.69H2r} \right) \right) \quad (3-44)$$

- **Conductor horizontal en círculo de diámetro D.**

Ecuación de H. B. Dwight (Dwight, 1936).

$$R_G = \frac{\rho}{4\pi^2 D} \left(\ln \left(\frac{8D}{r} \right) + \ln \left(\frac{2D}{H} \right) \right) \quad (3-45)$$

4 Mallas “ground grid”.

Las mallas son SPT híbridos entre electrodos verticales y horizontales, estas disposiciones son utilizadas en subestaciones eléctricas donde es prioritario el control de las tensiones de paso, contacto al momento de una falla del sistema o en una descarga atmosférica y tensiones transferidas creadas por los campos electromagnéticos de las líneas, y los equipos de potencia. En numerales posteriores se hace un mayor análisis de las tensiones mencionadas en el párrafo anterior.

Para realizar un cálculo estimado de una RPT como dato inicial se puede utilizar la ecuación (3-46), la cual determina la resistencia de una placa metálica circular a una profundidad cero de enterramiento (IEEE Power and Energy Society, 2013).

$$R_G = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (3-46)$$

Agregando un segundo término a la ecuación (3-46) se tiene una limitación a la RPT a calcular de la siguiente manera.

- **Ecuación de Laurent-Niemann** (IEEE Power and Energy Society, 2013).

$$R_G = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_t} \quad (3-47)$$

Para cálculos básicos de resistencia en mallas cuadradas con una configuración de cruz central, es decir con 4 cuadrados homogéneos internos, esto se observa en las ecuaciones (3-48) para malla cuadrada de lado L y en la ecuación (3-49) que es una malla cuadrada de lado L con división central en cruz.

Ecuaciones de Seidman (Wayne, 2000).

$$R_G = \frac{\rho}{0.2061L} (0.0304 - 0.0083 \ln(\frac{2bH}{L^2})) \quad (3-48)$$

$$R_G = \frac{\rho}{0.2061L} (0.0475 - 0.0054 \ln(\frac{2bH}{L^2})) \quad (3-49)$$

Las ecuaciones (3-50) y (3-52) se estipulan para rejillas de cables enterrados, al momento de incluir electrodos verticales la metodología de cálculo de RPT se puede realizar mediante las fórmulas de Sverak o las de Schwarz (IEEE Power and Energy Society, 2013).

- **Ecuación de Sverak.**

$$R_G = \rho \left[\frac{1}{L_t} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20}} \right) \right] \quad (3-50)$$

$$L_t = L_c + L_v \quad (3-51)$$

Donde:

R_G : Resistencia de puesta a tierra (Ω).

A: Área que cubre la malla (m^2).

h: Profundidad de enterramiento de la malla (m).

L_t : Longitud total de electrodos (m).

L_c : Longitud total de cable (m).

L_v : Longitud total de varillas ($L_v = \text{número de varillas} \times \text{longitud de una varilla}$ m).

- Ecuación de Schwarz (Schwarz, 1954).

$$R_G = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (3-52)$$

$$R = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{\sqrt{2bh}} \right) + \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (3-53)$$

$$\begin{aligned} K_1 &= -0.04 \frac{L_x}{L_y} + 1.41; \text{ si } h \leq 0.1 * \sqrt{A} \\ K_1 &= -0.05 \frac{L_x}{L_y} + 1.13; \text{ si } h \leq 1/6 * \sqrt{A} \\ K_1 &= -0.05 \frac{L_x}{L_y} + 1.2; \text{ Para el resto} \end{aligned} \quad (3-54)$$

$$\begin{aligned} K_2 &= 0.15 \frac{L_x}{L_y} + 5.5; \text{ si } h \leq 0.1 * \sqrt{A} \\ K_2 &= 0.05 \frac{L_x}{L_y} + 4.4; \text{ si } h \leq 1/6 * \sqrt{A} \\ K_2 &= 0.1 \frac{L_x}{L_y} + 4.68; \text{ si } h \leq 0.1 * \sqrt{A} \end{aligned} \quad (3-55)$$

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_v L_v} \left[\ln \left(\frac{4L_v}{b} \right) - 1 + \frac{2K_1 L_v (\sqrt{n_v} - 1)^2}{\sqrt{A}} \right] \quad (3-56)$$

$$R = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{L_v} \right) + \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (3-57)$$

Para las ecuaciones anteriores.

R_G : Resistencia de puesta a tierra (Ω).

R_1 : Resistencia de los conductores de la rejilla (Ω).

R_2 : Resistencia de las varillas de tierra (Ω).

R_m : Resistencia mutua de las resistencias R_1 y R_2 (Ω).

L_C : Longitud total del cable (m).

L_v : Longitud total de las varillas (m).

L : lado de la malla (m).

n_v : Número de varillas.

a : Radio de las varillas (m).

b : Radio de los conductores de la rejilla (m).

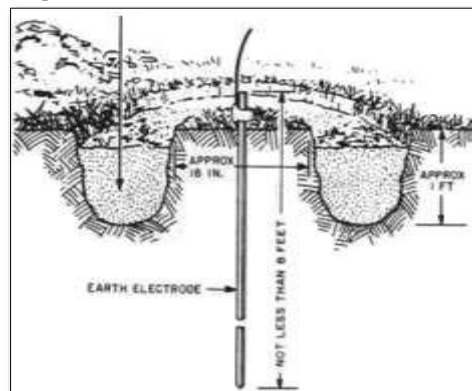
5 Tratamientos químicos para puestas a tierra.

En varias oportunidades el diseñador de puesta a tierra se encuentra con la problemática de resistividades muy altas o el área de construcción del SPT se encuentra limitado, es por ello que se hace difícil en obtener valores de resistencia cercanas a los estipulados en el RETIE como se observa en la Tabla 2, es de gran importancia tener en cuenta que un bajo valor de RPT limita la máxima elevación de potencial en la tierra.

Para colaborar al sistema a reducir el valor de resistencia se puede hacer uso de los materiales mejoradores de puesta a tierra, dichos materiales tienen como principales características una resistividad muy baja “valores inferiores a $10 \Omega.m$ ”, aumentar la sección transversal del conductor, aumentar el área de contacto con el terreno y brindar una protección del electrodo frente a la corrosión.

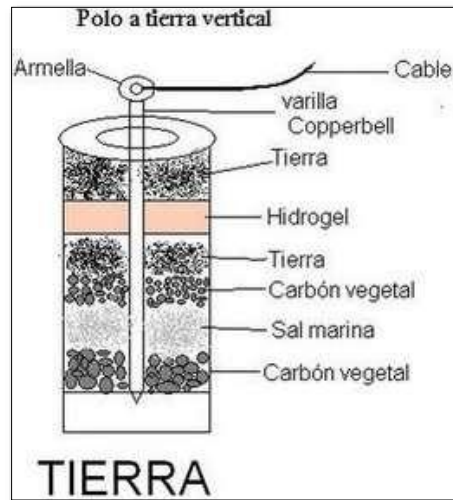
Una de las prácticas implementadas como mejoramiento de resistencia es la de incorporar elementos minerales como el carbón, polvo de carbón, cloruro de sodio y elementos metálicos o eléctricos como lo son cables baterías entre otros, ver Figura 3-12 y Figura 3-13. La mayor desventaja que se observa en la implementación de esta metodología es la alta corrosión que se presenta en los electrodos debido a componentes químicos que aceleran dicho proceso de corrosión.

Figura 3-12. Tratamiento con sales



Fuente: (Ruelas, 2009b)

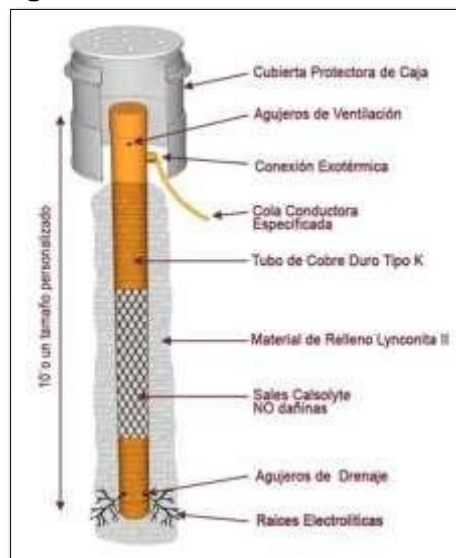
Figura 3-13. Mejorador de varios materiales.



Fuente: (Compusoftwareusco, 2014)

Otro método de implementación de sales son los denominados electrodos electrolíticos, los cuales son tubos de cobre o acero inoxidable que tienen un grupo de componentes en su interior, a medida del paso de las lluvias en el terreno drena los componentes internos modificando con ellos la resistividad del terreno circundante al electrodo instalado. Con lo anterior mencionado se sobre entiende que dichos electrodos requieren de un mantenimiento regular, para recargar los tubos con más material del producto (Lyncolespañol, 2011).

Figura 3-14. Electrodo electrolítico.



Fuente: (Lyncolespañol, 2011)

La bentonita es una arcilla de color pardo que tiene un PH de 10.5, con una resistividad aproximada de $2.5 \Omega \cdot m$ y la capacidad de absorber hasta 5 veces su peso en agua, esta última característica es ideal para la reducción de la resistencia de las puestas a tierras Figura 3-15. El contener tan altas cantidades de agua aumenta la posibilidad de corrosión de los electrodos.

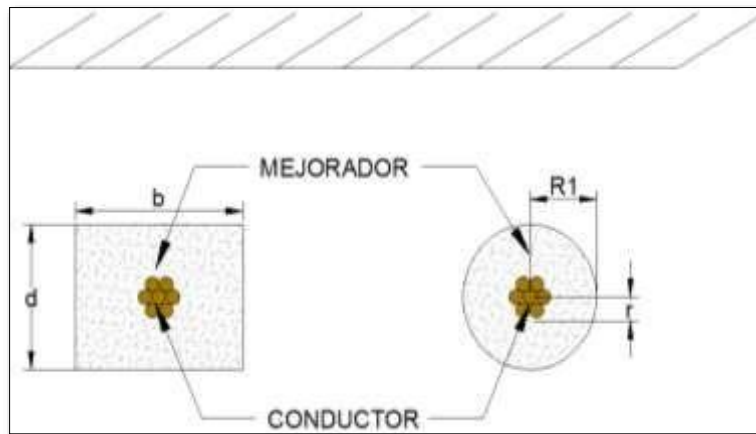
Figura 3-15. Bentonita ARCICOL



Fuente: (Bentocol, 2017)

En los últimos años se puede encontrar en el mercado eléctrico los cementos conductivos, un mejorador de puesta a tierra que tiene conducción electrónica e iónica, esto traduce en una conducción eléctrica en estado húmedo o en estado seco, esto lo hace inmune a épocas de sequía. El cemento conductivo al mantener una resistividad constante en el tiempo es posible determinarlo como un conductor de radio equivalente $R1$, ver Figura 3-16.

Figura 3-16. Radio equivalente con mejorador.



Fuente: (Kurtovic & Vujevic, 2000)

Figura 3-17. Cemento conductor celec



Fuente: (Celec, 2019)

6 Cálculo de RPT con mejorador de puesta a tierra.

La implementación de un mejorador de puesta a tierra permite la reducción de la resistencia calculada con anterioridad con las diversas ecuaciones expuestas, dicha reducción difiere porcentualmente dependiendo del mejorador a ser implementado y su comportamiento en el tiempo.

A continuación, se presentan algunas ecuaciones para obtener un valor de resistencia mediante la utilización de mejoradores de puesta a tierra.

- **Electrodo vertical con material mejorador.**

Ecuación de Fagan-Lee (Carpenter & Lanzoni, 2007).

$$R_G = \frac{1}{2 * \pi * L_v} \left(\rho \left(\ln \left(\frac{8L_v}{2r_1} \right) - 1 \right) + \rho \left(\ln \left(\frac{8L_v}{2r} \right) - 1 \right) - \rho \left(\ln \left(\frac{8L_v}{2r_1} \right) - 1 \right) \right) \quad (3-58)$$

- **Electrodo horizontal con material mejorador de puesta a tierra.**

Ecuación C.L Hallmark.

$$R_G = \frac{\rho}{2.73L_t} \log \left(\frac{2L_t^2}{Hw} \right) \quad (3-59)$$

- **Contra-antena con dos brazos en 90 °.**

Ecuación C.L Hallmark.

$$R_G = \frac{1.03\rho}{2.73L_t} \log\left(\frac{2L_t^2}{Hw}\right) \quad (3-60)$$

- **Contra-antena con dos brazos en paralelo.**

Ecuación Sankosha (Sankosha, 2006).

$$R_G = \frac{\rho}{2.73L_t} \left(\log\left(\frac{L_t^2}{H2w}\right) + \log\left(\frac{L_t}{g}\right) \right) \quad (3-61)$$

- **Contra-antena con dos brazos en cruz (Sankosha, 2006).**

Ecuación Sankosha (Sankosha, 2006).

$$R_G = \frac{1.12\rho}{2.73L_t} \log\left(\frac{L_t^2}{H2w}\right) \quad (3-62)$$

- **Contra-antena con tres brazos equitativos (Ruelas, 2009a).**

Ecuación C.L Hallmark.

$$R_G = \frac{1.06\rho}{2.73L_t} \log\left(\frac{2L_t^2}{Hw}\right) \quad (3-63)$$

- **Contra-antena con cuatro brazos equitativos.**

Ecuación C.L Hallmark (Ruelas, 2009a).

$$R_G = \frac{1.12\rho}{2.73L_t} \log\left(\frac{2L_t^2}{Hw}\right) \quad (3-64)$$

- **Contra-antena con seis brazos equitativos.**

Ecuación C.L Hallmark (Ruelas, 2009a).

$$R_G = \frac{1.42\rho}{2.73L_t} \log\left(\frac{2L_t^2}{Hw}\right) \quad (3-65)$$

- **Contra-antena con ocho brazos equitativos.**

Ecuación C.L Hallmark (Ruelas, 2009a).

$$R_G = \frac{1.65\rho}{2.73L_t} \log\left(\frac{2L_t^2}{Hw}\right) \quad (3-66)$$

Para las ecuaciones anteriores se estipulan las siguientes connotaciones.

- R_G : Resistencia de puesta a tierra (Ω).
- ρ : Resistividad del terreno ($\Omega.m$).
- L_t : Longitud total del conductor (m).
- H: Profundidad de enterramiento (m).
- w: Ancho de utilización del mejorador de puesta a tierra (m).
- g: Separación de los brazos (m).
- L_V : Longitud de la varilla (m).
- r_1 : Radio del recubrimiento (m).
- ρ_1 : Resistividad del material mejorador ($\Omega.m$)

3.2.3. VENTAJAS DE APLICACIÓN DE MATERIALES MEJORADORES.

La implementación de materiales mejoradores de puesta a tierra, cuya resistividad es constante, no se ven afectados por las condiciones del medio ambiente y son usados recubriendo alrededor de los electrodos que componen el SPT, presentan las siguientes ventajas (Lee & Wang, 2009):

- Reducción de la resistencia de puesta a tierra.
- Reducción de la resistencia entre 25 % y 45 % en terrenos de alta resistividad (Tu, He, & Zeng, 2006).
- Protección de los electrodos a la corrosión.
- Disminución del tiempo al despejar las fallas eléctricas.
- Disminución del mantenimiento de las puestas a tierras.
- Mayor control de las tensiones de contacto y de paso.
- Aumento de la vida útil del sistema de puesta a tierra.

3.2.4. CÁLCULOS DE SPT CON ESTÁNDAR IEEE 80-2013

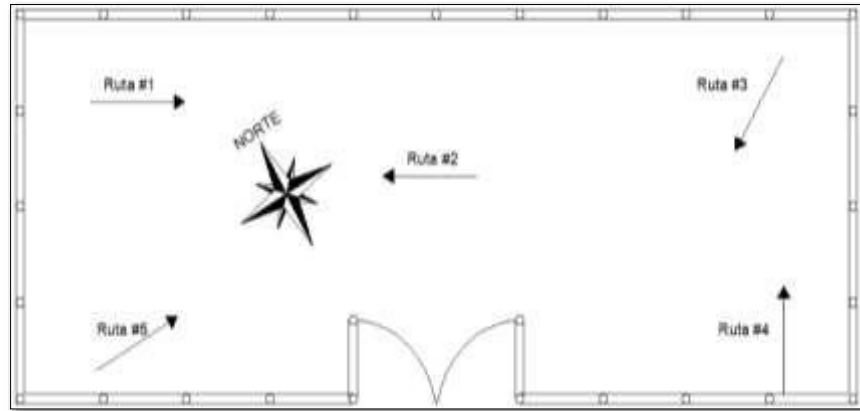
El estándar de la IEEE 80 es una metodología que está centrada en la protección de las personas al realizar un control de las tensiones de paso y de contacto al momento de falla o tensiones transferidas producidas por los campos electromagnéticos en subestaciones eléctricas de alta tensión. Para el proceso de cálculo de las tensiones mencionadas se deben de tener en cuenta las diferentes variables que interactúan al momento de una falla como lo son la resistividad del terreno, la corriente de falla de la subestación, posibles ampliaciones de la malla, las líneas eléctricas que ingresan y salen de la locación, entre otras. El estándar estipula un procedimiento que se puede observar en la Figura 2-1.

3.2.4.1 RESISTIVIDAD DEL TERRENO.

Es de gran importancia obtener el perfil de resistividades del terreno en una subestación eléctrica, debido a que en general estas locaciones se encuentran en áreas de un tamaño considerable "áreas > 100 m²", es por ello que se requiere realizar varias rutas de

medidas como se observa en la Figura 3-18. En los numerales 3.1.1.1 y 3.1.1.2 se explica con mayor detenimiento las metodologías de medida y procesamiento de datos de resistividades.

Figura 3-18. Rutas medidas de resistividad.



Fuente: Autor.

3.2.4.2 CALIBRE DEL CONDUCTOR

La selección del conductor adecuado para el proyecto tiene como base soportar las diferentes corrientes de falla, dando una correcta disipación de la misma. Se tienen dos expresiones que se utilizan para calcular el área mínima que debe tener el conductor dependiendo de la magnitud de corriente y el tiempo de despeje de la falla.

$$A_{mm^2} = \frac{IK_f \sqrt{T_c}}{1.9737} \quad (3-67)$$

En donde:

A_{mm^2} : Sección transversal del conductor (mm^2).

K_f : constante se encuentra en la Tabla 7.

T_c : Tiempo de despeje de falla (s).

Tabla 7. Constantes de materiales.

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD (%)	Tm (°C)	Kf
Cobre blando.	100	1083	7
Cobre duro cuando se utiliza soldadura exotérmica.	97	1084	7.06
Cobre duro cuando se utiliza conector mecánico.	97	250	11.78
Alambre de acero recubierto con cobre.	40	1084	10.45
Alambre de acero recubierto con cobre.	30	1084	14.64
Varilla de acero recubierta de cobre.	20	1084	14.64
Aluminio grado EC.	61	657	12.12
Aleación de aluminio 5005.	53.5	652	12.41
Aleación de aluminio 6201.	52.5	654	12.47
Alambre de acero recubierto de aluminio.	20.3	657	17.2

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD (%)	T _m (°C)	K _f
Acero 1020.	10.8	1510	15.95
Varilla de acero recubierta de en acero inoxidable.	9.8	1400	14.72
Varilla de acero con baño de zinc (galvanizado).	8.5	419	28.96
Acero inoxidable 304.	2.4	1400	30.05

Fuente: (IEEE Power and Energy Society, 2013)

Una forma más rigurosa de calcular el área del conductor se observa en las ecuaciones (3-68) (3-69)

$$A_{mm^2} = \frac{I}{\sqrt{\frac{TCAP \times 10^{-4}}{T_c \alpha_r \rho_r} \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)}} \quad (3-68)$$

$$A_{kcmil} = \frac{197.4I}{\sqrt{\frac{TCAP}{T_c \alpha_r \rho_r} \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)}} \quad (3-69)$$

Donde:

TCAP: Capacidad térmica por unidad de volumen (J/cm³°C).

T_c: Tiempo de despeje de la falla (S).

T_r: Tiempo de referencia para materiales (°C).

α_r: Coeficiente térmico de resistividad a una temperatura T_r (1/°C).

ρ_r: Resistividad del conductor a una temperatura T_r (μΩ-cm).

K₀: 1/ α₀ en °C.

T_m: Máxima temperatura de fusión o unión mecánica (°C).

T_a: Temperatura ambiente (°C).

Tabla 8. Constantes de materiales.

Descripción	Conductividad del material (%)	α _r factor a 20°C (1/°C)	K ₀ a 0°C (0°C)	Temperatura de fusión T _m	ρ _r 20°C (μΩ-cm)	TCAP capacidad térmica [J/(cm ³ °C)]	K _f
Cobre blando	100	0.00393	234	1083	1.72	3.42	7
Cobre duro, comercial	97	0.00381	242	1084	1.78	3.42	7.06
Acero recubierto con cobre	40	0.00378	245	1084	4.4	3.85	10.45
Alambre de acero recubierto con cobre.	30	0.00378	245	1084	5.86	3.85	12.06

Descripción	Conductividad del material (%)	α factor a 20°C (1/°C)	K_0 a 0°C (0°C)	Temperatura de fusión T_m	ρ a 20°C ($\mu\Omega\text{-cm}$)	TCAP capacidad térmica [J/(cm ³ °C)]	Kf
Varilla de acero recubierta de cobre.	20	0.00378	245	1084	8.62	3.85	14.64
Aluminio grado EC.	61	0.00403	228	657	2.86	2.56	12.12
Aleación de aluminio 5005.	53.5	0.00353	263	652	3.22	2.6	12.41
Aleación de aluminio 6201.	52.5	0.00347	268	654	3.28	2.6	12.47
Acero recubierto con aluminio	20.3	0.0036	258	657	8.48	3.58	17.2
Acero 1020.	10.8	0.00316	605	1510	15.9	3.28	15.95
Varilla de acero recubierta de en acero inoxidable.	9.8	0.0016	605	1400	17.5	4.44	14.72
Varilla de acero con baño de zinc (galvanizado).	8.6	0.0032	293	419	20.1	3.93	28.96
Acero inoxidable 304.	2.4	0.0013	749	1400	72	4.03	30.05

Fuente: (IEEE Power and Energy Society, 2013)

Al obtener ya un área mínima con las ecuaciones anteriores, se aproxima el valor calculado a uno que corresponda al conductor comercial inmediatamente por encima, ver Tabla 9. En varias circunstancias el cálculo del área mínima del conductor nos determina cable de menor calibre, se debe tener en cuenta seleccionar un conductor con un área no menor a 50 mm² como lo estipula el RETIE, ver Tabla 6

Tabla 9. Características de conductores comerciales

Calibre del conductor	Área		N° hilos	Diámetro de cada hilo	Diámetro exterior	Peso aproximado
	Kcmil	mm ²		mm	mm	Kg/km
1/0	105.6	53.49	7	3.12	9.35	485
2/0	133.1	67.43	7	3.5	10.5	611
3/0	167.8	85.01	7	3.93	11.8	771
4/0	211.6	107.22	7	4.42	13.3	972
250	250	127	12	3.67	15.2	1149
300	300	152	12	4.02	16.7	1378
350	350	177	12	4.34	18	1610
400	400	203	19	3.69	18.5	1838
450	450	228	19	3.91	19.6	2067
500	500	253	19	4.12	20.6	2297
550	550	279	37	3.1	21.7	2527

Calibre del conductor	Área		N° hilos	Diámetro de cada hilo	Diámetro exterior	Peso aproximado
	Kcmil	mm ²		mm	mm	Kg/km
600	600	304	37	3.23	22.6	2757
650	650	329	37	3.37	23.6	2986
700	700	355	37	3.49	24.4	3216
750	750	380	37	3.62	25.3	2446

Fuente: (CENTELSA S.A, 2017).

3.2.4.3 TENSIONES DE PASO Y CONTACTO PERMISIBLES.

Como se había establecido anteriormente, el estándar ANSI/IEEE-80 en su versión 2013 se basa en la protección de las personas limitando la cantidad crítica de energía de choque que ingresa al cuerpo humano (Ramirez & Cano, 2010). Es por ello que se tienen dos criterios para el cálculo de tensiones de paso y de contacto soportables por el ser humano teniendo como base una resistencia promedio de 1000 Ω para el humano.

La máxima diferencia de tensión que soporta un cuerpo humano con una masa corporal de 50 kg se calcula mediante las ecuaciones (3-70) y (3-71).

$$E_{p50} = \frac{0.116(1000 + 6C_s\rho_s)}{\sqrt{t_c}} \quad (3-70)$$

$$E_{t50} = \frac{0.116(1000 + 1.5C_s\rho_s)}{\sqrt{t_c}} \quad (3-71)$$

Para el segundo criterio se estipula tensiones permisibles para una persona con masa corporal de 70 kg, calculándose con las ecuaciones (3-72) y (3-73).

$$E_{p70} = \frac{0.157(1000 + 6C_s\rho_s)}{\sqrt{t_c}} \quad (3-72)$$

$$E_{t70} = \frac{0.157(1000 + 1.5C_s\rho_s)}{\sqrt{t_c}} \quad (3-73)$$

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} \quad (3-74)$$

Donde:

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_c}} \text{ Corriente tolerable para un cuerpo de 70 kg en función del tiempo (A)}$$

$$\frac{0.116}{\sqrt{t_c}} \text{ Corriente tolerable para un cuerpo de 50 kg en función del tiempo (A).}$$

$R_b = 1000 \Omega$ Resistencia promedio del cuerpo humano.

$1000 + 1.5C_s\rho_s$ Resistencia a tierra de los 2 pies juntos contiguos a una placa superficial.

$1000 + 6C_s\rho_s$ Resistencia a tierra de los 2 pies separados a 2 m contiguos al suelo.

ρ_s : Resistividad del material de la capa superficial ($\Omega.m$).

C_s : Factor de disminución de la capa superficial, dada por la ecuación (3-74).

ρ : Resistividad del terreno ($\Omega.m$).

h_s : Espesor de la capa superficial (m).

t_c : tiempo despeje de la falla (s).

Realizando un análisis de las expresiones descritas anteriormente, se puede inferir las siguientes observaciones para aumentar las tensiones tolerables.

- Con tiempo de despeje de falla menores.
- Aumentando el espesor del material de la capa superior.

Seleccionando materiales con resistividades más altas para la capa superficial, ver

- Tabla 10.

Tabla 10. Resistividades típicas de materiales superficiales.

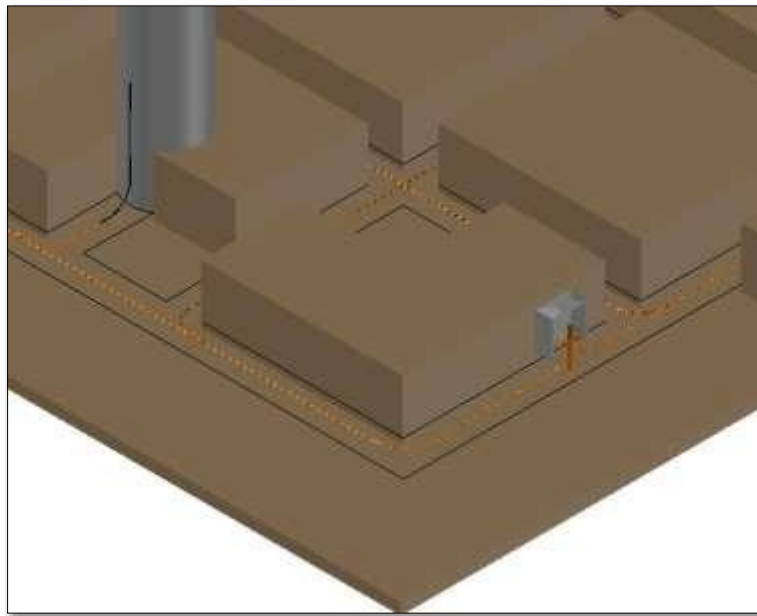
Ítem	Descripción del material superficial	Resistividad ($\Omega.m$)	
		Estado seco	Estado húmedo
1	Granito triturado fino	140×10^6	1300 (45 $\Omega.m$ con agua subterránea)
2	Granito triturado fino (1 1/2")	4000	1200 (100 $\Omega.m$ con agua de lluvia)
3	Granito fino de 3/4" a 1"	---	6513 (45 $\Omega.m$ después de 10 min de drenar agua)
4	Granito lavado n°4 de 1" a 2"	De 1.5×10^6 a 4.5×10^6	5000 (100 $\Omega.m$ con agua de lluvia)
5	Granito lavado n°3 de 2" a 4"	De 2.6×10^6 a 3×10^6	10000 (100 $\Omega.m$ con agua de lluvia)
6	Piedra caliza, tamaño desconocido	7×10^6	De 2000 a 3000 (45 $\Omega.m$ con agua subterránea)
7	Granito lavado, similar a grava de 3/4"	2×10^6	10000
8	Granito lavado, similar a la gravilla	40×10^6	5000
9	Granito lavado n°57 de 3/4"	190×10^6	8000 (45 $\Omega.m$ con agua subterránea)
10	Asfalto	De 2×10^6 a 30×10^6	De 10000 a 6×10^6
11	Concreto	De 1×10^6 a 10^9	De 21 a 200

Fuente: (IEEE Power and Energy Society, 2013).

3.2.4.4 DISEÑO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA.

La base de los diseños de puesta a tierra en el estándar ANSI/IEEE-80 en su versión 2013 es la combinación de electrodos verticales y electrodos horizontales en una distribución tipo rejilla, ver Figura 3-19, es decir con una cuadrícula dentro del área de distribución de los cables. Las disposiciones de dicha rejilla pueden ser implementadas en mallas cuadradas, rectangulares o en forma de L.

Figura 3-19. Detalle rejilla malla puesta a tierra



Fuente: Autor.

Como metodología se requiere de un diseño base, el cual al finalizar los cálculos puede llegar a ser modificado, dependiendo del cumplimiento de unos requisitos para los cálculos posteriores. Las cuadrículas internas deben ser homogéneas para realizar el control de tensiones de paso reales.

3.2.4.5 CÁLCULO DE RESISTENCIA DE LA REJILLA.

En el numeral 3.2.2 se determinan diferentes métodos para el cálculo de mallas de puestas a tierras. La ecuación (3-50) de Sverak y la ecuación (3-52) de Schwarz en las cuales al realizar un análisis de la constitución de las fórmulas, se observa una mayor influencia del área que recubre el mallado a diferencia de los demás términos, como por ejemplo la longitud del conductor en horizontal.

En la Tabla 11 se realiza cálculos de resistencia por los métodos mencionados con anterioridad para una resistividad de 500 Ω .m, 100 m de conductor, 10 varillas copperweld de 2,44 m x 5/8" y un área de la malla de 10x10 m.

Tabla 11. Cálculo resistencia de rejillas.

Ecuación	Resistividad (Ω .m)	Área (m^2)	Longitud de cable (m)	Número de varillas	Longitud total de electrodos (m)	Resistencia (Ω)
Sverak	500	100	100	N/A	100	24.554
Sverak	500	100	100	10	124.4	23.585
Schwarz	500	100	100	10	N/A	20.698

Fuente: Autor.

En la Tabla 12 se hace el aumento de la cantidad de conductor enterrado en el interior de la rejilla, se mantendrá la misma área de la malla, la misma resistividad y el número de electrodos verticales.

Tabla 12. Cálculo de resistencia aumentando cantidad de cable.

Ecuación	Resistividad (Ω .m)	Área (m^2)	Longitud de cable (m)	Número de varillas	Longitud total de electrodos (m)	Resistencia (Ω)
Sverak	500	100	220	N/A	220	21.825
Sverak	500	100	220	10	244.4	21.602
Schwarz	500	100	220	10	N/A	20.016

Fuente: Autor.

A continuación, se realiza el mismo análisis con los datos iniciales ampliando las dimensiones de la malla de 10 x 10m a 16.6 x 16.6m y manteniendo la cantidad de 100 m de conductor, ver los resultados en la Tabla 13.

Tabla 13. Cálculo de resistencia variando área de la malla.

Ecuación	Resistividad (Ω .m)	Área (m^2)	Longitud de cable (m)	Número de varillas	Longitud total de electrodos (m)	Resistencia (Ω)
Sverak	500	277.8	100	N/A	100	17.293
Sverak	500	277.8	100	10	124.4	16.325
Schwarz	500	277.8	100	10	N/A	14.157

Fuente: Autor.

Mediante la implementación de la ecuación C.L Hallmark (3-59) se obtiene el valor de la RPT utilizando un mejorador de puesta a tierra que no varié su resistividad en el tiempo, se realiza los cálculos para los ejercicios de la Tabla 11 y la Tabla 12, es relevante destacar que la formula a ser utilizada en la Tabla 14 está en función del área de contacto del mejorador con el terreno circundante. Los resultados se obtienen para una profundidad de enterramiento de 0.75 m, un ancho de la zanja de 0.3 m y un espesor del material de 0.05 m.

Tabla 14. Cálculo de resistencia utilizando mejorador de puesta a tierra.

Ecuación	Resistividad ($\Omega.m$)	Área (m^2)	Longitud de cable (m)	Número de varillas	Longitud total de electrodos (m)	Resistencia (Ω)
Hallmark	500	100	100	N/A	100	9.06
Hallmark	500	100	220	N/A	220	4.69

Fuente: Autor.

Dentro del estándar, solo se estipula como método de cálculo de la resistencia de la malla las ecuaciones de Sverak y la de Schwarz, pero dichas ecuaciones presentan una deficiencia al momento de implementar una mayor cantidad de conductor en una misma área, la reducción de la resistencia es mínima en contraste a la cantidad de cable adicional que se aplica “entre un 3% y 11%”.

La utilización de mejoradores de puesta a tierra, aunque es sugerido por las normas y los reglamentos, no se encuentra incluida un lineamiento o ecuación para recalcular el valor de puesta a tierra al ser agregado un aditivo mejorador de puesta a tierra. Es por ello que se hace importante implementar otras fórmulas como la descrita en la ecuación (3-59), aclarando que dicha forma de calcular la RPT no interfiere con los cálculos posteriores en la metodología ANSI/IEEE-80 en su versión 2013.

En el ANEXO A. se presentan los resultados de un experimento cuyas características iniciales de ejecución se presentan en la Tabla 15, para validar las premisas expuestas anteriormente.

Tabla 15. Datos de ingreso experimento

Malla	Descripción	Unidad	Cantidad
1	Electrodo horizontal	m	21
	Área	m^2	10 (5x2)
	Profundidad de enterramiento	m	0.5
	Electrodo vertical	Uni	1
2	Electrodo horizontal	m	35
	Área	m^2	10 (5x2)
	Profundidad de enterramiento	m	0.5
	Electrodo vertical	Uni	1
3	Electrodo horizontal	m	35
	Área	m^2	10 (5x2)
	Profundidad de enterramiento	m	0.5
	Electrodo vertical	Uni	1
	Material mejorador de puesta a tierra	kg	105

3.2.4.6 CÁLCULO DE LA CORRIENTE MÁXIMA A SER DISIPADA POR LA REJILLA.

Es la corriente máxima que ha de circular por la malla al momento de la falla y que depende de varios factores que están dados por:

$$I_G = I_F * D_f * S_f * C_p \quad (3-75)$$

Donde:

I_F : Corriente simétrica de falla a tierra en A.

D_f : Factor de decremento de la malla.

S_f : Factor de división de corriente.

C_p : Factor de crecimiento de la corriente de falla, en futuras ampliaciones de la subestación.

a) Corriente simétrica de falla a tierra.

Es la mayor corriente que circula en la subestación al momento de una falla eléctrica, es recomendable la utilización de las siguientes fórmulas, para fallas de línea-línea-tierra (L-L-T) o para fallas línea-tierra (L-T), debido a ser estas corrientes las de mayor frecuencia de incidencia en los sistemas eléctricos (Ramirez & Cano, 2010).

$$L_{T(L-L-T)} = 3I_0 = \frac{3EZ_2}{Z_1(Z_1 + Z_2) + Z_0 Z_2} \quad (3-76)$$

$$L_{T(L-T)} = 3I_0 = \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (3-77)$$

Donde:

I_0 : Valor eficaz de secuencia cero de la corriente en A.

E: Tensión de fase – neutro valor eficaz en V.

Z_1 : Impedancia de secuencia positiva del sistema en la ubicación de la falla.

Z_2 : Impedancia de secuencia negativa del sistema en la ubicación de la falla.

Z_0 : Impedancia de secuencia cero del sistema en la ubicación de la falla.

b) Factor de decremento de la malla.

El factor de decremento está dado por la siguiente expresión.

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_c} (1 - e^{-\frac{2t_c}{T_a}})} \quad (3-78)$$

$$T_a = \frac{X}{wR} = \frac{X}{R} * \frac{1}{2f} \quad (3-79)$$

Donde:

T_a : Constante de tiempo de la componente DC.

T_C : Duración de la falla en segundos.

X, R: Componentes de impedancia subtransitoria para determinar la relación X sobre R.

c) Factor de crecimiento de la subestación.

Es un factor en porcentaje que determina posibles aumentos de la subestación a futuro, de no haber crecimiento de la localidad el C_p es igual a 1.

d) Factor de división de corriente.

El factor de división de corriente es un valor obtenido como equivalencia de las impedancias de los cables de guarda de las líneas de entrada y salida de una subestación, con ello se pretende calcular la corriente que se disipa en la malla de la subestación y que porcentaje es disipada por las estructuras adscritas a dicha subestación. Mediante la ecuación (3-80) se calcula el factor de división de corriente.

$$S_{f(x/y)} = \left| \frac{Z_{eq_{x/y}}}{R_g + Z_{eq_{x/y}}} \right| \quad (3-80)$$

$Z_{eq_{x/y}}$: Impedancia equivalente para n número de líneas de entrada y salida.

R_g : Resistencia de puesta a tierra del SPT.

3.2.4.7 TIEMPO DE DESPEJE DE LA FALLA

El tiempo de despeje de falla es determinado por los equipos de protección de la subestación en el cálculo de coordinación de protecciones, valores típicos de tiempos de despeje se encuentran entre los rangos de 180 a 500 ms (IEEE Power and Energy Society, 2013).

3.2.4.8 CÁLCULO DE LA ELEVACIÓN DE TENSIÓN DE TIERRA.

Un valor bajo de RPT es ideal para reducir a elevación del potencial de tierra (GPR por sus siglas en inglés), que se encuentra dispuesto por la siguiente ecuación.

$$GPR = I_G * R_G \quad (3-81)$$

3.2.4.9 TENSIONES DE PASO Y CONTACTO REALES.

TENSIÓN DE CONTACTO.

El valor de tensión de contacto se calcula mediante la siguiente expresión.

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_M} \quad (3-82)$$

Donde:

- ρ : Resistividad aparente del terreno ($\Omega \cdot m$).
- I_G : Máxima corriente a disipar por la malla (kA).
- K_m : Valor geométrico de espaciamiento de la malla.
- K_i : factor de irregularidad.
- L_M : Longitud efectiva enterrada (m).

- **Valor geométrico de espaciamiento de la malla.**

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd_c} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd_c} - \frac{h}{4d_c} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \quad (3-83)$$

- D: Distancia entre dos conductores cuales quiera dentro de la rejilla (m).
- d_c : Diámetro del conductor (m).
- h: Profundidad de enterramiento (m).
- K_{ii} : Coeficiente de corrección, este factor es igual a 1 para mallas con varillas.
- K_h : Coeficiente que tiene en cuenta los efectos de la profundidad de la rejilla.
- n: Número de conductores en paralelo a la malla rectangular.

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}} \quad (3-84)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad \text{con } h_0 = 1m \quad (3-85)$$

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (3-86)$$

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p}; n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}}; n_c = \left[\frac{L_X L_Y}{A} \right]^{\frac{0.7A}{L_X L_Y}}; n_d = \frac{D}{\sqrt{L_X^2 + L_Y^2}} \quad (3-87)$$

Para rejillas cuadradas: $n = n_a$ debido a que $n_b = n_c = n_d = 1$.

Para rejillas rectangulares: $n = n_a \cdot n_b$ debido a que $n_c = n_d = 1$.

Para rejillas en forma de L: $n = n_a \cdot n_b \cdot n_c$ debido a que $n_d = 1$.

Donde:

L_p : Longitud del perímetro de la malla (m).

L_c : Longitud total de los electrodos horizontales (m).

L_x : Longitud máxima de la malla en el eje horizontal (m).

L_y : Longitud máxima de la malla en el eje vertical (m).

A: Área de cobertura de la malla (m^2)

D: Distancia máxima entre dos puntos cualesquiera de la rejilla (m).

- **Factor de irregularidad.**

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad (3-88)$$

- **Longitud efectiva enterrada (m).**

Para configuraciones sin electrodos verticales o unas pocas varillas la longitud efectiva está dada por la siguiente ecuación.

$$L_M = L_C + L_R \quad (3-89)$$

Para rejillas con varios electrodos distribuidos internamente y en la periferia de la misma la longitud efectiva está dada por:

$$L_M = L_c + [1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right)] L_R \quad (3-90)$$

Donde:

L_c : Longitud total de cable (m).

L_R : Longitud total de todas las varillas (m).

L_r : Longitud de cada varilla (m).

n_r : Número de varillas.

TENSIÓN DE PASO.

El valor de tensiones de paso se calcula mediante la siguiente expresión.

$$E_S = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_S \cdot K_i}{L_S} \quad (3-91)$$

Para configuraciones con o sin electrodos verticales, la longitud efectiva de conductores se calcula mediante la siguiente expresión:

$$L_S = 0.75L_C + 0.85L_R \quad (3-92)$$

El valor de K_S se puede calcular por la ecuación (3-93), cuando el SPT se encuentra enterrado a profundidades $0.25 \text{ m} < h < 2.5 \text{ m}$.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (3-93)$$

3.2.4.10 APROBACIÓN DEL DISEÑO.

Después de los cálculos de las tensiones soportables de paso y contacto se debe realizar un comparativo con el GPR, si las tensiones soportables son superiores al GPR se determina que el diseño es aprobado. Por el contrario de ser mayor el GPR el paso a seguir es el cálculo de las tensiones reales de paso y de contacto, e igualmente al paso anterior se compara las tensiones permisibles con las reales, de ser las tensiones soportables mayores a las reales el diseño puede ser aprobado y pasaría a proceso de refinamiento del plano para entrega. A continuación, el autor presenta en la Tabla 16 un resumen de lo estipulado anteriormente para dar mayor claridad.

Tabla 16. Condiciones de aprobación de diseño.

Tensiones tolerables	Condición	Tensiones de malla	Cumple	No cumple
Paso	>	GPR	Siguiente análisis	Rediseño de SPT
Contacto	>	GPR	Siguiente análisis	Rediseño de SPT
Paso	>	Paso	Siguiente análisis	Rediseño de SPT
Contacto	>	Contacto	Aprobación de diseño	Rediseño de SPT

Fuente: Autor.

3.2.4.11 SOLUCIONES PARA DISEÑOS NO APROBADOS.

- Reducir la resistencia de la malla, esto se puede lograr mediante la ampliación del área que cubre la rejilla en la subestación, aumentar el calibre del conductor, aumentar artificialmente la sección transversal del conductor utilizando materiales mejoradores de puesta a tierra, implementar más electrodos verticales. Al reducir la resistencia de la malla disminuye el GPR siendo un factor lineal como se puede observar en la ecuación (3-81).
- Aumentar el número de conductores en paralelo al perímetro de la rejilla, disminuyendo la distancia entre conductores y paralelamente disminuyendo el valor de la R_G .

- c) Aumentar el número de electrodos verticales dentro de la rejilla, lo cual afecta considerablemente las tensiones reales de paso.
- d) Aumentar la sección transversal de los conductores, con ello se reducen las tensiones reales de contacto.
- e) El obtener una capa superior de material de mayor resistividad o en su defecto aumentar el espesor de dicha capa, aumentando con ello las tensiones soportables para el personal que se encuentra en la subestación.
- f) Aumentar la profundidad de enterramiento del SPT evitando con ello que las tensiones producidas al momento de falla sean menos perceptibles.

En el RETIE (UPME, 2013) se orienta al diseñador y constructores unas medidas secundarias cuando no se logre realizar control de tensiones que superen el umbral de soportabilidad del ser humano, debido a altos valores de resistividad, tiempos de despeje de falla extensos o corrientes de falla elevadas.

- Restringir el acceso a zonas donde se puedan obtener mayores tensiones debido a fallas.
- Instalar plataformas equipotenciales para aumentar la protección al personal de las instalaciones.
- Aislar los equipos que puedan ser manipulados por las personas.
- Realizar uniones equipotenciales solidas de elementos metálicos externos al sistema eléctrico.
- Ubicar señalización en las zonas críticas de trabajo para el personal de la subestación.

3.2.5. MEJORAMIENTO DE SPT EXISTENTE.

Los electrodos de puesta a tierra al ser elementos que constantemente están en contacto con los componentes inherentes del suelo como lo son la humedad, minerales, componentes químicos, entre otros. Es por ello, que los electrodos se ven afectados por efectos de corrosión, aumentando en el proceso la resistencia inicial de la malla.

En la Tabla 3 el RETIE se estipula los tiempos de mantenimientos de las puestas a tierra dependiendo de la funcionalidad de la misma, dentro de los procedimientos de mejora de los SPT existentes se tienen los siguientes métodos según (Pillajo, 2013):

- El aumento del número de electrodos en paralelo.
- El aumento de la longitud de los electrodos y el diámetro de los electrodos.
- El aumento de la distancia entre ejes de los electrodos.
- El cambio del terreno existente por otro de menor resistividad.
- El tratamiento químico electrolítico del terreno.
- El rediseño o implementación de mallas a tierra.

3.3. DESARROLLO DE LA INTERFAZ GRÁFICA.

En numerales anteriores se realizó un análisis de las diferentes metodologías para las medidas de resistividad aparente del terreno y de resistencia de los SPT, adicionalmente se plasman las ecuaciones pertinentes para el cálculo de resistencia de puesta a tierra para los diferentes tipos de electrodos que se pueden implementar con sus variantes topológicas entre ellas.

A continuación, se presenta la descripción de la herramienta grafica TOTAL GRID.

3.3.1. DESCRIPCIÓN HERRAMIENTA SOFTWARE.

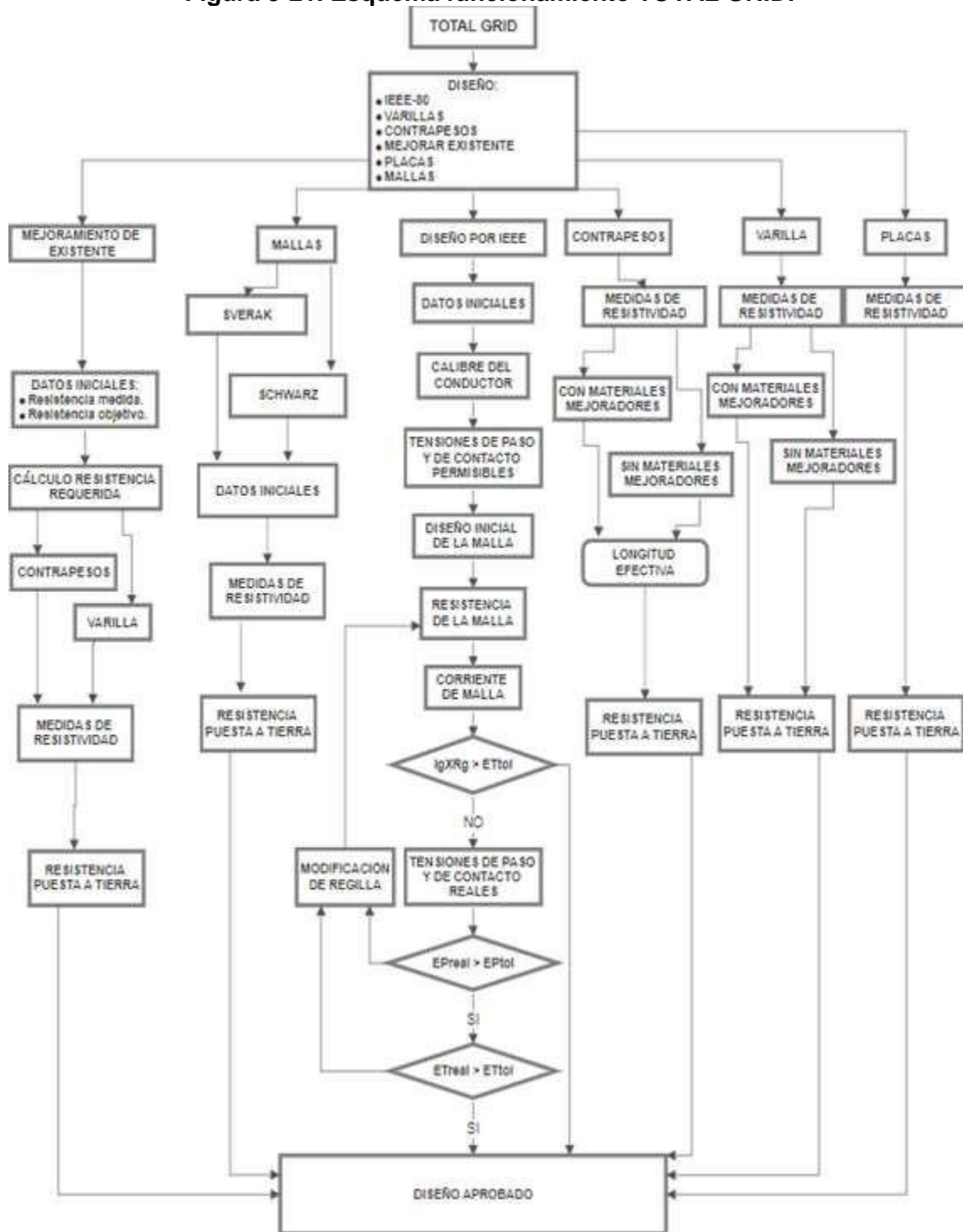
TOTAL GRID es una herramienta computacional para el diseño de SPT creado y desarrollado en la interfaz de programación del software MATLAB , ver Figura 3-20, el desarrollo de la herramienta se lleva a cabo incorporando el cálculo de la RPT de las configuraciones tales como, electrodos verticales con o sin materiales mejoradores de puesta a tierra y el paralelismo entre electrodos, electrodos horizontales sin tratamiento mejorador con sus configuraciones de estrellas, electrodos horizontales con tratamiento mejorador en sus topologías de contra-antenas, cálculo de placas metálicas enterradas, anillos perimetrales a las estructuras a proteger, mejoramiento de SPT cuyo valor de resistencia no cumple con los requerimientos de la normativa y los cálculos para diseños de SPT para uso en subestaciones eléctricas las cuales tienen como fundamento el control de tensiones de paso y de contacto. En la Figura 3-21 se observa el esquema de funcionamiento de la herramienta computacional.

Figura 3-20. TOTAL GRID.



Fuente: Autor.

Figura 3-21. Esquema funcionamiento TOTAL GRID.



Fuente: Autor.

La pantalla de inicio consta de dos botones y una ventana desplegable, en la Figura 3-22 se observa lo descrito anteriormente. El primer botón tiene una imagen de interrogación que al ser oprimido despliega una ventana con información al usuario, el segundo botón "INICIAR" el cual al ser activado lleva al operador hasta las diferentes ventanas de cálculo que se presentan en la opción desplegable, por último, una ventana de selección con las siguientes opciones:

- IEEE
- Varillas
- Electrodo horizontales
- Placas
- Mallas
- Mejorar existente

Figura 3-22. Pantalla inicial TOTAL GRID.



Fuente: Autor.

3.3.1.1 IEEE

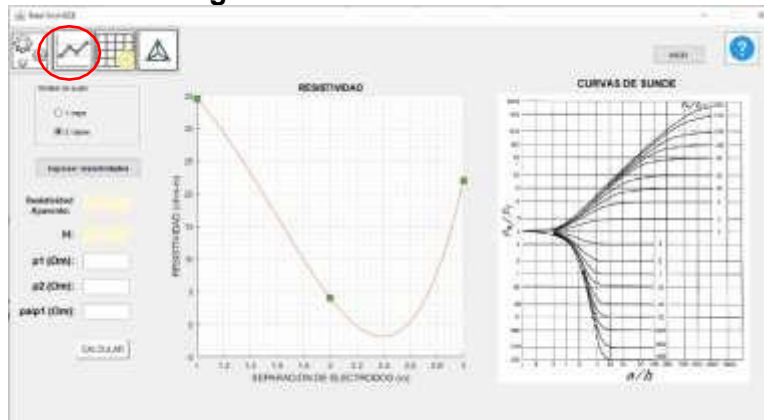
El usuario al ingresar a la sección para cálculos por el estándar ANSI/IEEE-80 en su versión 2013 se encontrará con una ventana emergente, en cuya primera pantalla se encuentran varias celdas para el ingreso de los datos iniciales como lo son la corriente de cortocircuito, frecuencia del sistema, temperatura ambiente, relación X/R (relación entre la reactancia y la resistencia de la línea) y el factor de crecimiento de la subestación. Además, en esta pantalla se realiza la selección del conductor a implementar en el diseño, ya sea mediante el cálculo o por criterio del diseñador. Adicionalmente, se expone la opción de ingresar las dimensiones con las cuales se han de implementar un material mejorador de puesta a tierra al proyecto. En la Figura 3-23 se detalla la pantalla inicial en el cálculo mediante la IEEE.

Figura 3-23. IEEE datos iniciales.

Fuente: Autor

Al seleccionar el segundo botón se accederá a la pantalla de resistividad, en la cual se podrá realizar el tratamiento de las medidas de resistividad descrito en el numeral 3.1.1.2. El software da las opciones de hacer el análisis de resistividades del terreno por una capa homogénea o por el método de dos capas mediante el método gráfico de sunde como se observa en la Figura 3-24.

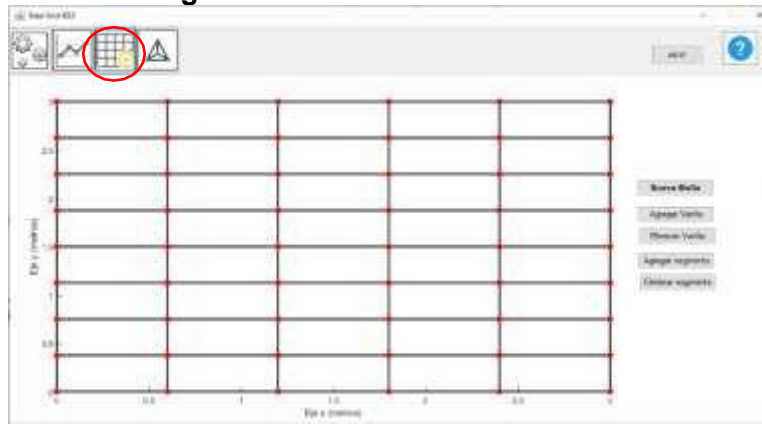
Figura 3-24. IEEE resistividad.



Fuente: Autor

En la Figura 3-25 se realiza la inserción de la rejilla para la cual se calculan la resistencia de puesta a tierra en conjunto a las tensiones reales y soportables. En este panel se tienen las opciones de realizar diseños de rejillas cuadradas, rectangulares y en forma de L. Adicionalmente, se cuenta con botones que permiten la adición o sustracción de electrodos verticales tipo varilla, adición o sustracción de segmentos de conductores horizontales.

Figura 3-25. IEEE diseño de malla.



Fuente: Autor

En el último panel se encuentran los cálculos más relevantes para el diseño, como lo son la resistencia de puesta a tierra, las tensiones tolerables y las tensiones reales. Dentro del recuadro de cálculo de resistencia se adiciona una ventana desplegable en la cual se permite el cálculo de la resistencia mediante tres diferentes metodologías Sverak, Schwarz y se adiciona el cálculo de electrodos horizontales ya sea con o sin implementación de mejorador de puesta a tierra.

Figura 3-26. IEEE tensiones reales y tolerables



Fuente: Autor

Como última función del panel se encuentran la comparación de las tensiones tolerables con las tensiones creadas al momento de una falla eléctrica, presentando una validación o una alarma de incumplimiento de las condiciones de aceptación del diseño, de ser esta última el resultado, la herramienta presenta una ventana emergente con una serie de acciones que pueden ser implementadas para ayudar al diseño.

3.3.1.2 VARILLAS

Al tomar la opción para calcular la RPT de una varilla o varias varillas en paralelo, se abre un panel como se muestra en la Figura 3-27, en donde se podrá optar por realizar cálculos de varillas con o sin tratamientos químicos, además se debe ingresar la cantidad de sondeos de resistividad realizadas y la distancia de separación de la primera medida.

Figura 3-27. Panel selección varillas.

Fuente: Autor.

La pantalla de tratamiento de la resistividad homogénea mediante el método probabilístico de BOX-COX es utilizado en varias de las metodologías de cálculo dicho panel se encuentra presentado en la Figura 3-28.

Figura 3-28. Panel análisis resistividad homogénea.

Separación [m]	Ruta 1	Ruta 2
1	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3	<input type="text"/>	<input type="text"/>
4	<input type="text"/>	<input type="text"/>
5	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Resistividad (Ω-m) por método BOX-COX
(con probabilidad del 70% de no ser superada)

Fuente: Autor

La selección del cálculo de RPT por varillas sin tratamiento lleva a la pantalla que se observa en la Figura 3-29, en la cual se puede realizar cálculo por medio de 3 fórmulas Dwight, Rüdénberg y Sankosha. Se puede obtener la resistencia de un arreglo de varillas enterradas y conectadas entre ellas mediante el aumento del número de varillas.

Figura 3-29. Panel resistencia varillas.

Electrodo vertical

Seleccionar método: DWIGHT (dropdown menu with options DWIGHT, RUDENBERG, SANKOSHA)

Radio de varilla (m): [input field]

Longitud de la varilla (m): [input field]

Número de varillas: [input field]

Resistencia (Ω): [highlighted field]

Calcular Generar reporte [? icon]

Fuente: Autor.

Al acceder al cálculo de varillas con un recubrimiento artificial se encuentra con la Figura 3-30, este panel difiere del anterior visto por el ingreso de la resistividad del material mejorador de puesta a tierra, y el radio de recubrimiento del mismo en el electrodo vertical.

Figura 3-30. Panel resistencia varillas con tratamiento.

Electrodo vertical

Seleccionar método: FAGAN

Radio de varilla (m): [input field]

Longitud de la varilla (m): [input field]

Número de varillas: [input field]

Radio del recubrimiento (m): [input field]

Resistividad del material (Ω-m): [input field]

Resistencia (Ω): [highlighted field]

Calcular Generar reporte [? icon]

Fuente: Autor.

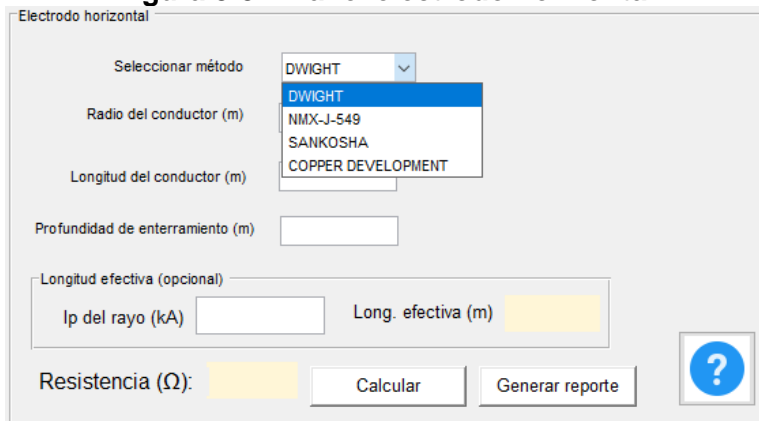
3.3.1.3 ELECTRODO HORIZONTAL

En la sección de Electrodo horizontal se encuentra un primer panel que ayuda a determinar el tipo de topología a ser utilizado, ya sean conductores con materiales mejoradores de puesta a tierra o sin mejorador. Para los diferentes métodos de calcular la resistencia de los Electrodo horizontal, se ha creado una celda que realiza el cálculo de la longitud efectiva para cada uno de los conductores en un sentido de instalación, con ello se ayuda al diseñador a limitar la longitud de los mismos a una dimensión a la cual el

cable sea efectivo para la disipación de la energía producida por las descargas atmosféricas.

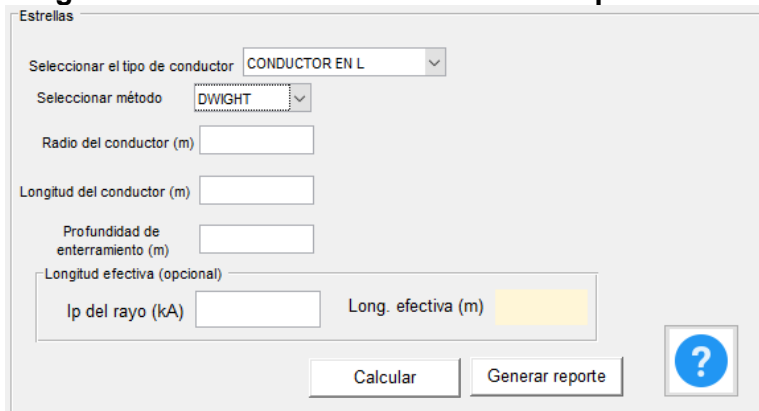
En la selección de Electrodo horizontal sin tratamiento químico se tienen 3 metodologías Electrodo horizontal, tipo estrellas y anillos perimetrales. En la Figura 3-31 se observa el panel para el electrodo horizontal implementado, en la Figura 3-32 se puede ver el panel para cable en configuración tipo estrella para los cuales se tiene cálculo para topologías de conductores en L, estrellas de 3, 4, 6, hasta 8 puntas; por último en la Figura 3-33 se tiene el panel para el cálculo de SPT tipo anillo perimetral alrededor de las estructuras a ser protegidas.

Figura 3-31. Panel electrodo horizontal.



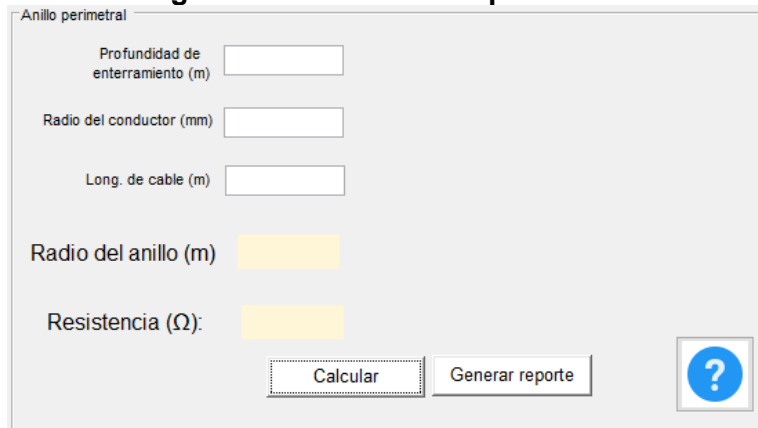
Fuente: Autor.

Figura 3-32. Panel electrodo horizontal tipo estrella.



Fuente: Autor.

Figura 3-33. Panel anillo perimetral.

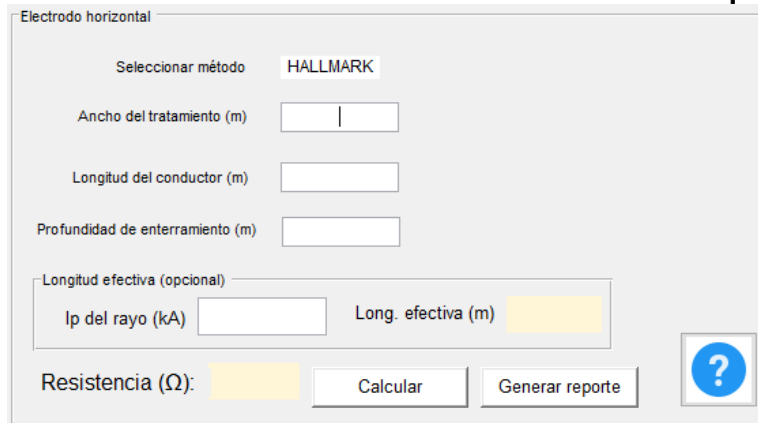


Fuente: Autor.

Al tomar la opción de cálculo de Electrodo horizontal aplicando mejorador de puesta a tierra, se ingresa a la pantalla que se muestra en la Figura 3-34, también se puede realizar cálculo de la longitud efectiva del conductor horizontal ingresando la corriente pico del rayo y las resistividades del terreno.

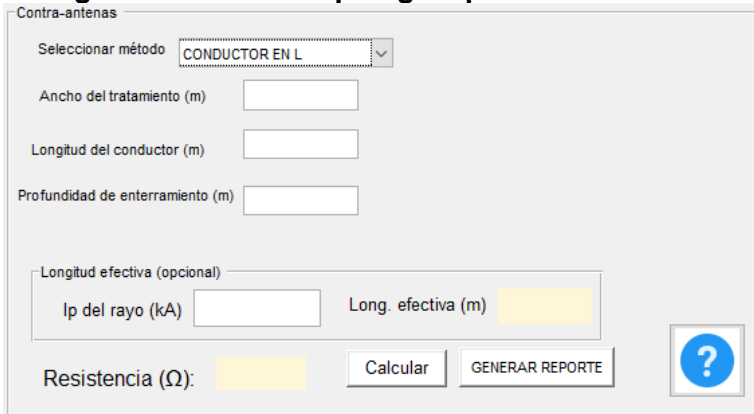
En la Figura 3-35 se presenta el panel donde se realiza el cálculo para un conductor horizontal con diferentes topologías como lo son en L, contra-antenas en cruz, contra-antenas de 2, 4, 6 y 8 brazos en paralelo. Adicionalmente, se tiene la oportunidad de calcular también la longitud efectiva de cada uno de los brazos descritos anteriormente, evitando diseños de Electrodo horizontal que sean poco efectivos frente a descargas atmosféricas.

Figura 3-34. Panel electrodo horizontal con tratamiento químico.



Fuente: Autor

Figura 3-35. Panel topología tipo contra-antenas.

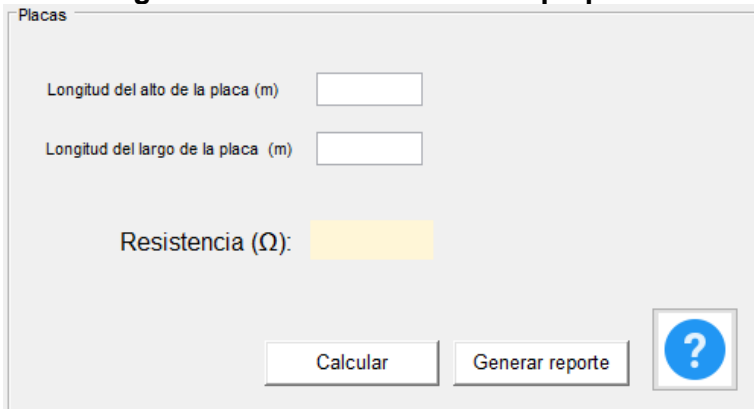


Fuente: autor.

3.3.1.4 PLACAS

En el panel del cálculo de RPT con placas metálicas se requiere de las dimensiones de la placa y la resistividad del terreno, ver Figura 3-36.

Figura 3-36. Panel electrodos tipo placa.



Fuente: Autor.

3.3.1.5 MALLAS

La selección de cálculos de SPT tipo malla en el cual no se requiere cálculos adicionales de tensiones de paso o de contacto, se puede realizar en la quinta opción en la pantalla inicio, llevando al panel que se muestra en la Figura 3-37, en el cual se puede realizar llevar a cabo cálculos mediante los métodos de Sverak y el método de Schwarz.

Es importante tener en cuenta que los cálculos por el método de Schwarz solo son para mallas cuya configuración incluye electrodos verticales.

Figura 3-37. Panel RPT de mallas.

Fuente: Autor.

3.3.1.6 MEJORAR SPT EXISTENTE

Para algunos proyectos donde ya se ha realizado una previa construcción de un SPT el cual no cumple con los valores de resistencia exigidos por el RETIE, TOTAL GRID cuenta con una sección donde se puede calcular una RPT para conectar en paralelo al sistema ya existente. También se puede contar con un cálculo de la distancia máxima de separación entre el SPT existente y el nuevo sistema a ser implementado.

Figura 3-38. Panel mejorar SPT existente.

Fuente: Autor.

En el anexo B se puede encontrar el manual de usuario del TOTAL GRID en donde se puede ver mayor información del uso del mismo e instalación.

3.4. VALIDACIÓN DE INTERFAZ GRÁFICA.

La validación del TOTAL GRID se lleva a cabo mediante la comparación de resultados entregados de la computación del software y los valores de salida en ejemplos presentados en estándares internacionales o por el cálculo de las diferentes ecuaciones expuestas en numerales anteriores.

En el capítulo siguiente se presenta una base de datos de ingreso que será común para los diferentes cálculos a realizarse como lo son:

- Resistividad aparente del terreno
- Longitud y calibre del conductor horizontal.
- Longitud, diámetro y cantidad de electrodos verticales.
- Profundidad de enterramiento de los electrodos.
- Dimensiones de la malla.

Los datos de ingreso en cuanto a la metodología de la ANSI/IEEE – 80 son importados de los ejemplos expuestos en el mismo estándar en sus anexos.

En el capítulo 4 se presentan los resultados arrojados en la validación del software.

4. RESULTADOS

4.1. VALIDACIÓN DE SOFTWARE.

La validación de la herramienta de diseño para las ecuaciones externas al algoritmo de la IEEE, se realizó mediante el uso de los datos iniciales que se presentan a continuación.

4.2. DATOS DE INGRESO

- RESISTIVIDAD.

En el TOTAL GRID se han determinado hasta dos posibles rutas de sondeos y resistividad, dichas rutas se realizan en el terreno para poder tener una certeza de las medidas tomadas, esto se puede observar en la Figura 3-18.

Resistividad del terreno ($\Omega.m$):

Tabla 17. Datos resistividad ejemplo.

Profundidad	Ruta 1	Ruta 2
1 m	258	245
2 m	280	262
3 m	257	268

Fuente: Autor.

- CONDUCTOR HORIZONTAL.

Profundidad de enterramiento (m): 0.75

Conductor horizontal: 2/0

Diámetro del conductor (m): 0.01063 (INCE LTDA, 2018)

Cantidad de cable (m): 76

Distancia entre Electrodo horizontal (m): 3

- ELECTRODOS VERTICALES.

Longitud Varillas (m): 2.44

Diámetro de varillas (in): 5/8

Número de varillas: 6

- MALLAS.

Lado mayor (m): 9

Lado menor (m): 6
Separación de rejillas (m): 3
Número de varillas: 6

- PLACAS

Alto (m): 8
Ancho (m): 3

- MATERIAL MEJORADOR.
Resistividad del material ($\Omega.m$): 0.048 (Celec, 2019).
Ancho del recubrimiento (m): 0.3
Altura del recubrimiento (m): 0.05
Radio de recubrimiento varilla (m): 0.0508

- PARÁMETROS DEL RAYO.

En la Tabla 18 se determina el valor medio pico de la corriente de retorno de un rayo en Colombia el cual se encuentra expuesto en la NTC 4552-1.

Tabla 18. Mediana del valor pico de la corriente de retorno del rayo en diferentes zonas del planeta.

País	Mediana (kA)
Estados Unidos	23
Suiza	30
Suecia	30
Polonia	31
Malasia	36
Brasil	43
Rodesia	42
Colombia	43

1) Monte Cachimbo, minas Gerais, Brasil 1996.
2) Valor estimado mediante mediciones de campo eléctrico a menos de 100 km y aplicando el método MTL.

Fuente: (ICONTEC, 2008)

4.2.1. CÁLCULO RESISTIVIDAD HOMOGÉNEA.

Para el cálculo de una resistividad del terreno se implementa el método probabilístico de BOX-COX, en el ejercicio planteado se determinan 2 rutas con 3 de medidas de resistividad por cada una.

- Para iniciar con el método se realiza un promedio entre las medidas de las rutas realizadas obteniendo los siguientes resultados.

1m = 251.5 $\Omega.m$
2m = 271 $\Omega.m$

$$3m = 262.5 \Omega.m$$

- Utilizando la fórmula (3-7) se obtienen el logaritmo natural de las resistividades promedios.

$$x_1 = 5.52744299$$

$$x_2 = 5.60211882$$

$$x_3 = 5.57025108$$

- La media de los valores anteriores se obtiene mediante la fórmula (3-8).

$$\bar{x} = 5.5666043$$

- El paso siguiente es el cálculo que se determina en la ecuación (3-9).

$$(x_1 - \bar{x})^2 = 0.001533608$$

$$(x_2 - \bar{x})^2 = 0.001261281$$

$$(x_3 - \bar{x})^2 = 0.000013299$$

- La desviación estándar se obtiene al implementar la ecuación (3-10).

$$\zeta = 0.03059514$$

- Mediante una distribución normal invertida para una probabilidad del 70% de no ser superada se obtiene una z de 0.524400513.
- La resistividad homogénea para el ejercicio se calcula utilizando la ecuación (3-11).

$$\rho_e = 265.775 \Omega.m.$$

4.2.2. RESISTIVIDAD HOMOGÉNEA CON TOTAL GRID

El cálculo de la resistividad homogénea en la interfaz gráfica se requiere del ingreso de los datos iniciales entregados por el ejercicio, al tenerlos ordenados en sus respectivas celdas al oprimir el botón "Calcular", se obtiene un valor de resistividad homogénea de 265.775 $\Omega.m$ ver Figura 4-1.

Figura 4-1. Calculo resistividad TOTAL GRID.

Separación [m]	Ruta 1	Ruta 2	
1	258	245	<input type="checkbox"/> Rellenar
2	280	262	<input type="checkbox"/> Vaciar
3	257	268	

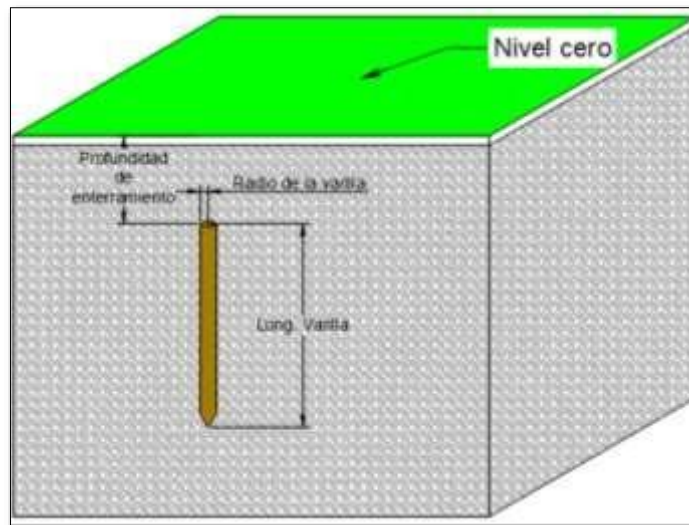
Resistividad ($\Omega\text{-m}$) por método BOX-COX
(con probabilidad del 70% de no ser superada) **265.775**

Fuente: Autor

4.3. CÁLCULO RESISTENCIA DE ELECTRODOS VERTICALES.

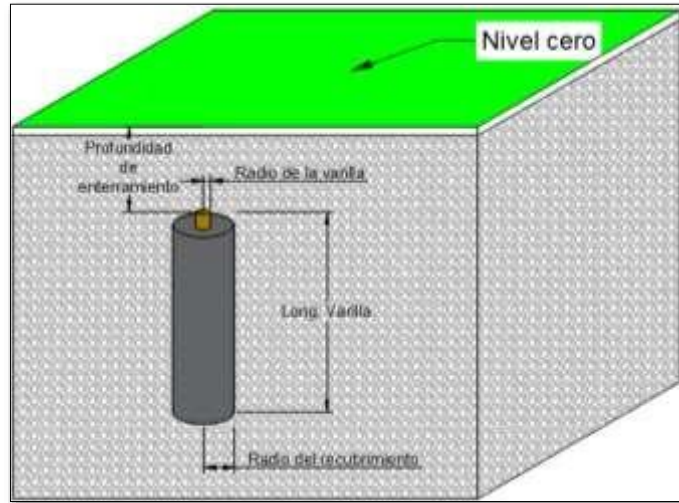
Para el cálculo de RPT implementando varillas se hará mediante dos (2) metodologías, una es el uso de los electrodos directamente en el terreno ver Figura 4-2 y una segunda donde se realiza un recubrimiento a la varilla con un material de muy baja resistividad, aumentando artificialmente su sección transversal, ver Figura 4-3.

Figura 4-2. Parámetros para varillas.



Fuente: Autor

Figura 4-3. Parámetros para varilla con mejorador.



Fuente: Autor.

4.3.1. VARILLAS CON MEJORADOR

Para el cálculo de electrodos verticales recubiertos con un material de baja resistividad se utiliza la ecuación (3-58) para la cual se requiere de las dimensiones de la varilla y el radio de recubrimiento del material mejorador de puesta a tierra, los resultados se observan en la Tabla 19, en las celdas inferiores de la tabla se encuentran los valores resultantes por la interfaz gráfica evaluada.

Tabla 19. RPT varillas con tratamiento.

Tipo de cálculo	Resistencia de 1 varilla (Ω)	Resistencia de 6 varillas (Ω)
Valor calculado	73.824	19.349
Resultado por TOTAL GRID	<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"> <p>Método cálculo varilla</p> <p>Seleccionar método: FAGAN</p> <p>Radio de varilla (m): 0.0079375</p> <p>Longitud de la varilla (m): 2.44</p> <p>Numero de varillas: 1</p> <p>Radio del recubrimiento (m): 0.0508</p> <p>Resistencia (Ω): 73.8244</p> </div>	<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"> <p>Método cálculo varilla</p> <p>Seleccionar método: FAGAN</p> <p>Radio de varilla (m): 0.0079375</p> <p>Longitud de la varilla (m): 2.44</p> <p>Numero de varillas: 6</p> <p>Radio del recubrimiento (m): 0.0508</p> <p>Resistencia (Ω): 19.3492</p> </div>

Fuente: Autor.

4.3.2. VARILLAS SIN MEJORADOR

Los cálculos para determinar la RPT utilizando electrodos verticales se estipulan por H.B. Dwight en la ecuación (3-15), en la ecuación de Sankosha (3-17) y por Rüdemberg en la ecuación (3-16). En la Tabla 20 se plasman los resultados arrojados de incluir los datos predeterminados para la validación en las tres fórmulas descritas anteriormente, en la tercera fila de la tabla se presenta la resistencia de 6 electrodos conectados en paralelo, cuyo valor se obtiene mediante la ecuación (3-18).

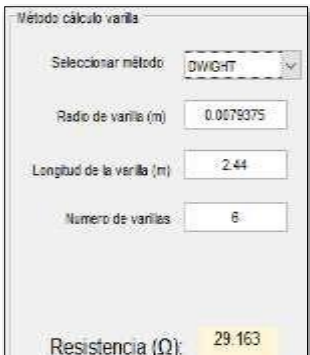

Tabla 20. Resultados RPT varillas.

Topología	H. B. Dwight	Sankosha	Rüdemberg
1 varilla	105.999	111.268	111.319
6 varillas en paralelo	27.78	29.1630	29.1763

Fuente: Autor.

En la Tabla 21 se presentan los resultados obtenidos utilizando la herramienta computacional, implementando las mismas condiciones iniciales expuestas con anterioridad, incluyendo el cálculo del paralelismo de 6 varillas mediante la ecuación (3-18).

Tabla 21. Resultados TOTAL GRID varillas sin tratamiento.

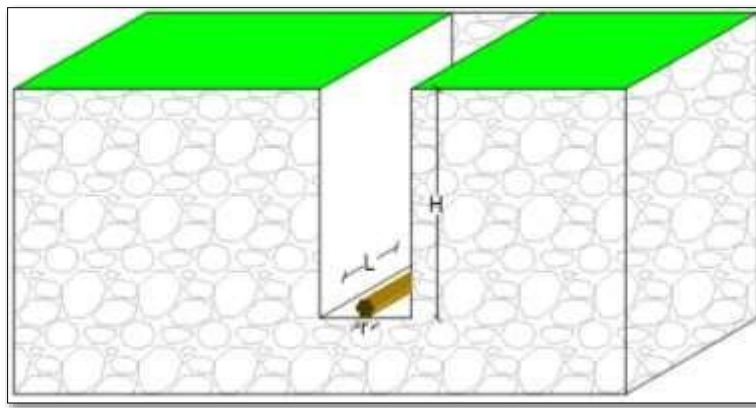
Ecuación	H. B. Dwight	Sankosha	Rüdemberg
Resistencia Rg (Ω)			
6 varillas en paralelo			

Fuente: Autor.

4.4. ELECTRODO HORIZONTAL

La sección de Electrodo horizontal se divide en dos grupos electrodo horizontal con tratamiento mejorador de puesta a tierra y electrodo horizontal sin mejorador, adicionalmente en todos los paneles se puede realizar el cálculo de la longitud efectiva del electrodo horizontal mediante el uso de la ecuación (3-19), obteniendo una longitud efectiva de 29,93 m para una corriente pico del rayo de 43 kA. Dentro del grupo de Electrodo horizontal sin tratamiento se observan 3 tipos de configuraciones como lo son electrodo horizontal, tipo estrella y el anillo perimetral alrededor de la estructura. Los parámetros requeridos para el cálculo de resistencia de conductor horizontal en cualquiera de sus configuraciones se muestran en la Figura 4-4 y en la Tabla 22 se presentan los resultados del cálculo de resistencia para las configuraciones descritas anteriormente y cuyas fórmulas se presentaron en el numeral 3.2.2.

Figura 4-4. Parámetros para electrodo horizontal.



Fuente: Autor.

Tabla 22. Resultados RPT electrodos horizontal.

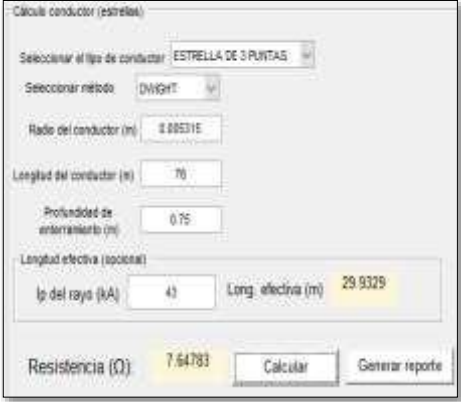
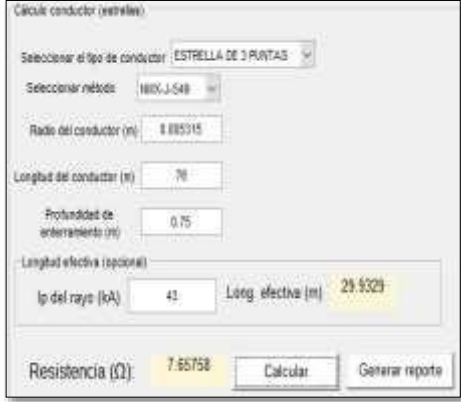
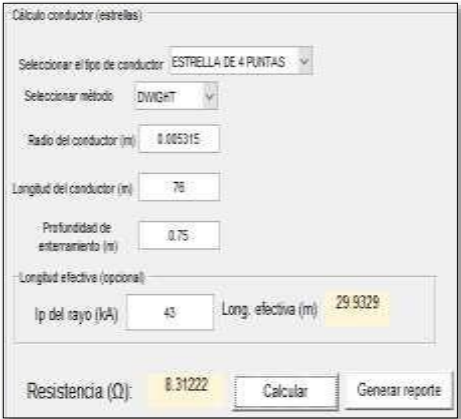
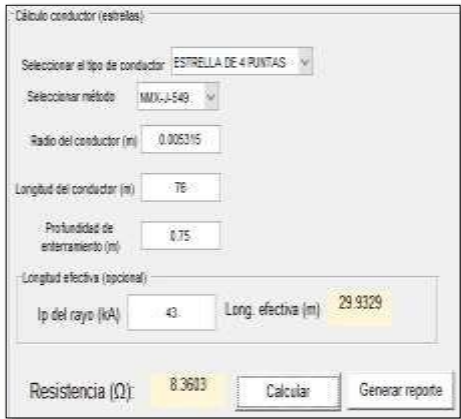
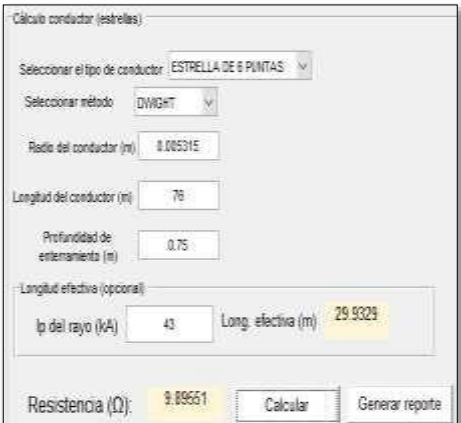
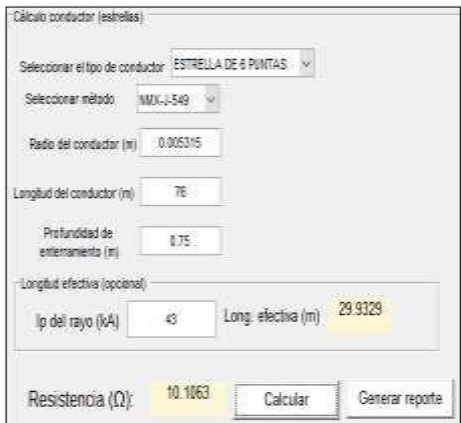
Topología	Dwight	NMX-549	Sankosha	Cooper-Develoment	
Electrodo horizontal	7.179	7.168	7.507	7.510	
Tipo estrella	En L	7.383	7.377	N/A	N/A
	3 puntas	7.648	7.658	N/A	N/A
	4 puntas	8.312	8.360	N/A	N/A
	6 puntas	9.896	10.106	N/A	N/A
	8 puntas	11.600	12.085	N/A	N/A
Anillo perimetral	8.165	N/A	N/A	N/A	

Fuente: Autor.

A continuación, se presentan en la Tabla 23 los resultados obtenidos mediante la herramienta computacional. Para las diferentes topologías de electrodos horizontales es relevante denotar que la longitud efectiva es igual, debido a que este factor está sujeto a la corriente del rayo y la resistividad del terreno.

Tabla 23. Resultados TOTAL GRID Electrodo horizontal.

Topología	Dwight	NMX-549
Conductor horizontal		
	Sankosha	Cooper-Develoment
Tipo estrella En L		

Topología	Dwight	NMX-549
<p>Tipo estrella 3 puntas</p>		
<p>Tipo estrella 4 puntas</p>		
<p>Tipo estrella 6 puntas</p>		

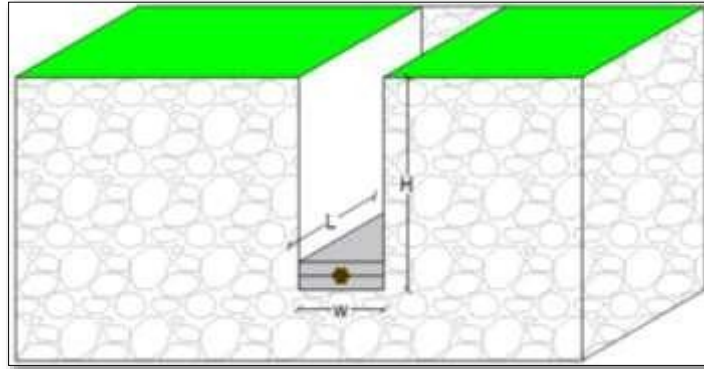
Topología	Dwight	NMX-549
Tipo estrella 8 puntas		
Anillo perimetral		

Fuente: Autor.

4.4.1. ELECTRODO HORIZONTAL CON TRATAMIENTO

Para el cálculo de la resistencia para electrodos horizontales con materiales mejoradores de puesta a tierra se encuentra estipulada por las topologías de conductores en horizontal y las diferentes configuraciones de contra-antenas. Los parámetros necesarios para evaluar la resistencia para conductores con mejoradores se presentan en la Figura 4-5, en la Tabla 24 se presentan los resultados de la evaluación del software TOTAL GRID.

Figura 4-5. Parámetros para conductor horizontal con tratamiento.



Fuente: Autor.

Tabla 24. Resultados RPT conductor horizontal con tratamiento.

Topología		Resistencia (Ω)
Electrodo horizontal		5.750
Contra-antenas	En L	5.922
	2 brazos en cruz	6.107
	2 brazos en paralelo	6.440
	3 brazos en paralelo	6.095
	4 brazos en paralelo	6.440
	6 brazos en paralelo	8.165
	8 brazos en paralelo	9.487

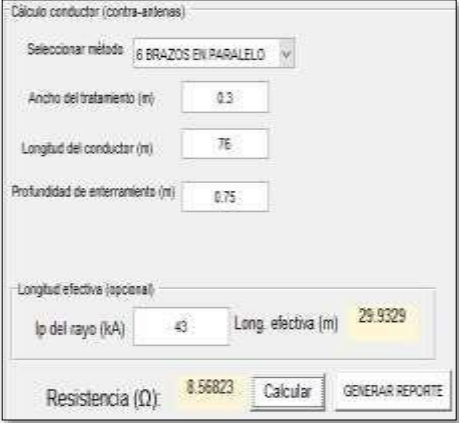
Fuente: Autor.

En la Tabla 25 los resultados del cálculo de resistencia para electrodos horizontales con aditivos químicos mejoradores de puesta a tierra y la longitud efectiva de los conductores.

Tabla 25. Resultados TOTAL GRID conductor horizontal con tratamiento.

Topología	Resistencia (Ω).
Electrodo horizontal	<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"> <p>Cálculo conductor (contrapesos)</p> <p>Seleccionar método: HALLMAR</p> <p>Ancho del tratamiento (m) <input type="text" value="0.3"/></p> <p>Longitud del conductor (m) <input type="text" value="76"/></p> <p>Profundidad de enterramiento (m) <input type="text" value="0.75"/></p> <p>Longitud efectiva (opcional)</p> <p>Ip del rayo (kA) <input type="text" value="43"/> Long. efectiva (m) <input type="text" value="29.9329"/></p> <p>Resistencia (Ω): <input type="text" value="6.03396"/> <input type="button" value="Calcular"/> <input type="button" value="Generar reporte"/></p> </div>

Topología		Resistencia (Ω).
Contra-antenas	En L	
	2 brazos en cruz	
	2 brazos en paralelo	

Topología	Resistencia (Ω).
3 brazos en paralelo	
4 brazos en paralelo	
6 brazos en paralelo	

Topología	Resistencia (Ω).
	<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"> <p>8 brazos en paralelo</p> </div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <p>Cálculo conductor (contra-antenas)</p> <p>Seleccionar método: 8 BRAZOS EN PARALELO</p> <p>Ancho del tratamiento (m): 0.3</p> <p>Longitud del conductor (m): 76</p> <p>Profundidad de enterramiento (m): 0.75</p> <hr/> <p>Longitud efectiva (opcional)</p> <p>Ip del rayo (kA): 43 Long. efectiva (m): 29.9329</p> <p>Resistencia (Ω): 9.95604 <input type="button" value="Calcular"/> <input type="button" value="GENERAR REPORTE"/></p> </div>

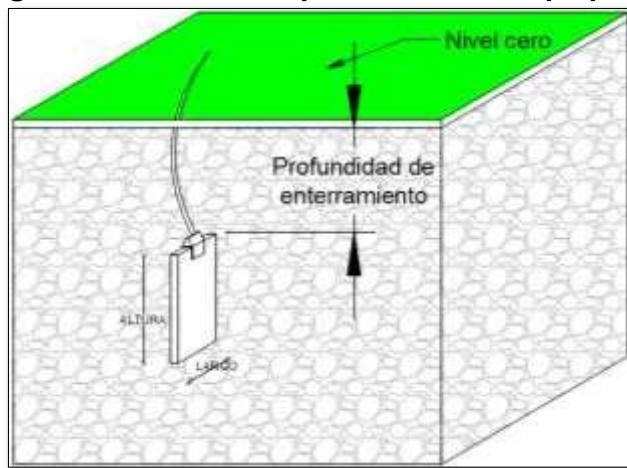
Fuente: Autor.

4.5. PLACAS

El cálculo de la resistencia para una placa metálica está determinado por la ecuación (3-14) y cuyos parámetros de ingreso son el largo y la altura de la placa como se muestra en la Figura 4-6, para una placa metálica con las características expuestas en la sección 4.1 su resistencia es de 24.112 Ω .

En la Figura 4-7 se muestra el resultado obtenido utilizando la herramienta TOTAL GRID.

Figura 4-6. Parámetros para electrodos tipo placa.



Fuente: Autor.

Figura 4-7. Cálculo resistividad TOTAL GRID

Placas

Longitud del alto de la placa (m)

Longitud del largo de la placa (m)

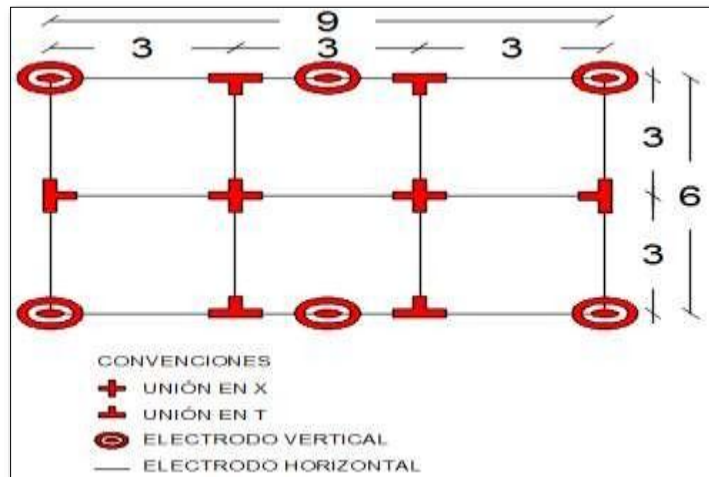
Resistencia (Ω): **24.1116**

Fuente: Autor.

4.6. MALLAS

En la Figura 4-8 se presenta el diseño de la malla propuesto en el ejercicio con dimensiones de 9 m de largo y 6 m de ancho con divisiones internas es de 3 m a una profundidad de enterramiento de 0.75 m, se adicionan 6 varillas copperweld de 2,44 m x 5/8".

Figura 4-8. Diseño de malla ejercicio.



Fuente: Autor.

Para realizar el cálculo de la resistencia mediante la metodología de Sverak con la ecuación (3-50). Debido a la utilización de 6 varillas en el ejercicio, se requiere calcular la longitud total de conductor a ser enterrado, mediante la fórmula (3-51) se determina dicho valor a ser usado.

$$L_T = 6 \cdot 2,44 + 9 \cdot 3 + 6 \cdot 4 = 65.64 \text{ m}$$

Y la resistencia calculada es.

$R_g = 17.689 \Omega$.

Para determinar la RPT de la rejilla mediante el método de Schwarz con la fórmula (3-50), se requiere de calcular los factores R_1 de la ecuación (3-53), R_2 descrita en la ecuación (3-56) y R_m de la ecuación (3-57). Los factores k_1 y k_2 se obtiene mediante las ecuaciones (3-53) y (3-54) respectivamente.

$K_1 = 1.055$.

$K_2 = 4.4750$.

$R_1 = 16.40186 \Omega$.

$R_2 = 21.92953 \Omega$.

$R_m = 12.57355 \Omega$.

$R_g = 15.289 \Omega$.

En la Tabla 26 se presentan los resultados del cálculo de resistencia para la malla propuesta, utilizando la herramienta computacional TOTAL GRID.

Tabla 26. Resultados TOTAL GRID mallas puesta a tierra

SVERAK		SCHWARZ	
<p>Mallas</p> <p>Long. de malla</p> <p>X: 8</p> <p>Y: 8</p> <p>Z: 0.75</p> <p>Nx: 3</p> <p>Ny: 4</p> <p>Método: Sverak</p> <p>Calibre del cable: 20</p> <p>Malla en L: <input type="checkbox"/></p> <p>Varillas</p> <p>No. varillas: 8</p> <p>Long. promedio de varillas (m): 2.44</p> <p>Diam. promedio varilla (m): 58</p> <p>Resistencia (Ω): 17.689</p> <p>Calcular</p> <p>Generar reporte</p>		<p>Mallas</p> <p>Long. de malla</p> <p>X: 8</p> <p>Y: 8</p> <p>Z: 0.75</p> <p>Nx: 3</p> <p>Ny: 4</p> <p>Método: Schwarz</p> <p>Calibre del cable: 20</p> <p>Malla en L: <input type="checkbox"/></p> <p>Varillas</p> <p>No. varillas: 8</p> <p>Long. promedio de varillas (m): 2.44</p> <p>Diam. promedio varilla (m): 58</p> <p>Resistencia (Ω): 15.2894</p> <p>Calcular</p> <p>Generar reporte</p>	

Fuente: Autor.

4.7. MEJORAR SPT EXISTENTE.

Para la verificación de los cálculos se propone una situación real, en la cual se necesita de un sistema de puesta a tierra con un valor menor a 10Ω , para la protección de un equipo detector de movimientos telúricos en el embalse del río Toná, ver Figura 4-9. Al momento de hacer la inspección se obtiene un valor de resistencia mayor al que requiere el proyecto ver Figura 4-10, por ello se realiza dos medidas de resistividad en una sola ruta, a profundidades de 1 m y 2 m como se presenta en la Figura 4-11.

El proveedor de los equipos electrónicos determina un tiempo máximo de despeje de cualquier falla eléctrica en 0.5 segundos, este tiempo está sujeto a los parámetros de las protecciones del equipo electrónico.

Figura 4-9. Equipo a proteger.



Fuente: (Liberal, 2016)

Figura 4-10. Medida RPT existente.



Fuente: (Celec, 2019).

Figura 4-11. Medidas de resistividad proyecto.



Fuente: (Celec, 2019).

A continuación, se realiza el análisis para el mejoramiento del valor de resistencia existente utilizando electrodos verticales en paralelo o ya sea con el uso de electrodos horizontales.

El cálculo exacto del valor de resistencia final al conectar el SPT a diseñar y el existente no se puede estipular fácilmente, una forma aproximada para saber el valor de resistencia a calcular es mediante el paralelismo de dos resistencias de la ecuación (4-1).

$$R_{obj} = \frac{R_{exi} * R_{cal}}{R_{exi} + R_{cal}} \quad (4-1)$$

Al despejar R_{cal} se puede obtener el valor de resistencia a calcular.

$$R_{cal} = \frac{R_{obj} * R_{exi}}{R_{exi} + R_{obj}} \quad (4-2)$$

Donde:

R_{obj} = Resistencia objetivo (Ω).

R_{exi} = Resistencia existente (Ω).

R_{cal} = Resistencia calculada (Ω).

Para el caso de estudio la resistencia que se debe calcular para conectar con la existente es de 18.772 Ω .

Realizando el procedimiento para determinar una resistividad homogénea del terreno, Como se procede en el numeral 4.2.1 se obtiene una resistividad de 708.14 Ω .m.

Se debe determinar una distancia máxima en la cual puede ser construida el nuevo sistema de compensación, dicha distancia se calcula mediante la siguiente expresión.

$$D_{max} = \frac{\rho I_d}{2\pi U} \quad (4-3)$$

Donde:

D_{max} : Distancia máxima entre puestas a tierra (m).

ρ : Resistividad del terreno ($\Omega \cdot m$).

I_d : Corriente de cortocircuito entregada por el operador de red (A).

U: 1200 V para sistemas de distribución con tiempos de despeje de falla inferiores a 0.5 segundos, en caso contrario serán 250 V (Schneider, 2000).

Mediante la (Montesdeoca, 1996) la ecuación (4-3) se obtiene una distancia máxima de 239.12 m utilizando los datos expuestos en la problemática y una corriente de cortocircuito de 2546 A, el cual es un valor típica de líneas de distribución radial (Garcés, Granada, & Gallego, 2004).

A continuación, se presentan 4 posibles diseños a ser implementados mediante el uso de varillas o electrodos horizontales.

- **Varillas.**

En la Tabla 27 se presentan los resultados de resistencia calculadas utilizando varillas copperweld de 2.44 m x 5/8" en las ecuaciones del numeral 3.2.2. El uso de un solo electrodo vertical no es suficiente para obtener un SPT con resistencia menor a 18.772 Ω .

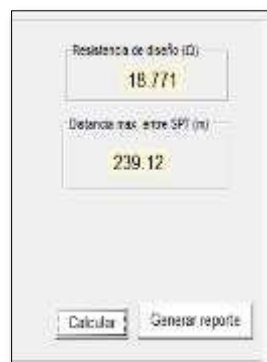
Tabla 27. Resultados RPT varillas, mejorar existente.

Topología	H. B. Dwight	Sankosha	Rüdenberg
1 varilla	282.427	296.465	296.601
32 varillas en paralelo	17.6063	18.4814	18.4899

Fuente: Autor.

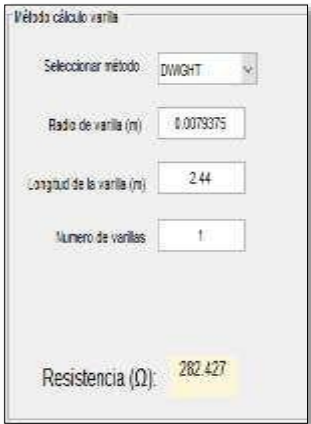
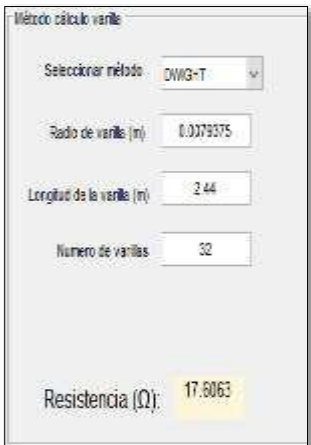


En la Figura 4-12 se observa el resultado expuesto por el TOTAL GRID para el cálculo de la distancia máxima entre SPT, adicionalmente, en la Tabla 28 se presentan los resultados obtenidos con la herramienta computacional.

Figura 4-12 Resultados TOTAL GRID distancia maxima entre SPT.



Fuente: Autor.

Tabla 28. Resultados TOTAL GRID varillas con tratamiento, mejorar existente.

Topología	H. B. Dwight	Sankosha	Rüdenberg
1 varilla			
32 varillas en paralelo			

Fuente: Autor.

- **Varillas con mejoradores.**

En el siguiente apartado se analizan los resultados para la configuración de varillas con mejorador de puesta a tierra, mediante la ecuación de Fagan-lee (3-58), en la Tabla 29 se presentan los resultados obtenidos de forma sistemática y los entregados por el TOTAL GRID.

Tabla 29. RPT varillas con tratamiento, mejorar existente.

Tipo de cálculo	Resistencia de 1 varilla (Ω)	Resistencia de 21 varillas (Ω)
Valor calculado	196.690	18.420
Resultado por TOTAL GRID		

Fuente: Autor.

- **Electrodos horizontales.**

En el siguiente apartado se presenta los resultados para los cálculos de las diversas topologías de electrodos horizontales, variando las cantidades de conductor a implementar para que la resistencia final calculada sea inferior a 18.771 Ω .







Tabla 30. Resultados RPT electrodo horizontal, mejorar existente.

Topología	Dwight	NMX-549	Sankosha	Cooper-Development
Electrodo horizontal Longitud cable	18.73 78 m	18.683 78 m	18.746 82 m	18.754 82 m
Tipo estrella	En L Longitud cable	18.439 82 m	18.426 82 m	N/A
	3 puntas Longitud cable	18.707 84 m	18.729 84 m	N/A
	4 puntas Longitud cable	18.435 94 m	18.540 94 m	N/A
	6 puntas Longitud cable	18.499 114 m	18.753 114 m	N/A
	8 puntas Longitud cable	18.547 136 m	18.708 138 m	N/A
Anillo perimetral Longitud cable	18.614 91 m	N/A	N/A	N/A

Fuente: Autor.

En la Tabla 31 se presentan los resultados entregados por el TOTAL GRID.

Tabla 31. Resultados TOTAL GRID electrodo horizontal, mejorar existente.

Topología	Dwight	NMX-549
Electrodo horizontal	 <p>Selección método: DWIGHT Radio del conductor (mm): 0.00315 Longitud del conductor (m): 75 Profundidad de enterramiento (m): 0.75 Resistencia de diseño (Ω): 18.771 Distancia max. entre SPT (m): 239.12 Longitud efectiva (opcional): Ip del rayo (kA): 42 Lang. efectiva (m): 48.8588 Resistencia (Ω): 18.7126</p>	 <p>Selección método: NMX-549 Radio del conductor (mm): 0.00315 Longitud del conductor (m): 75 Profundidad de enterramiento (m): 0.75 Resistencia de diseño (Ω): 18.771 Distancia max. entre SPT (m): 239.12 Longitud efectiva (opcional): Ip del rayo (kA): 41 Lang. efectiva (m): 48.8588 Resistencia (Ω): 18.6828</p>
	Sankosha	Cooper-Develoment
Tipo estrella En L	 <p>Selección método: SANKOSHA Radio del conductor (mm): 0.00315 Longitud del conductor (m): 82 Profundidad de enterramiento (m): 0.75 Resistencia de diseño (Ω): 18.771 Distancia max. entre SPT (m): 239.12 Longitud efectiva (opcional): Ip del rayo (kA): 43 Lang. efectiva (m): 48.8588 Resistencia (Ω): 18.7499</p>	 <p>Selección método: COOPER-DEVELOMENT Radio del conductor (mm): 0.00315 Longitud del conductor (m): 82 Profundidad de enterramiento (m): 0.75 Resistencia de diseño (Ω): 18.771 Distancia max. entre SPT (m): 239.12 Longitud efectiva (opcional): Ip del rayo (kA): 43 Lang. efectiva (m): 48.8588 Resistencia (Ω): 18.7545</p>
	 <p>Selección tipo de conductor: CONDUCTOR EN L Selección método: DWIGHT Radio del conductor (mm): 0.00315 Longitud del conductor (m): 82 Profundidad de enterramiento (m): 0.75 Resistencia de diseño (Ω): 18.771 Distancia max. entre SPT (m): 239.12 Longitud efectiva (opcional): Ip del rayo (kA): 43 Lang. efectiva (m): 48.8588 Resistencia (Ω): 18.4383</p>	 <p>Selección tipo de conductor: CONDUCTOR EN L Selección método: NMX-549 Radio del conductor (mm): 0.00315 Longitud del conductor (m): 82 Profundidad de enterramiento (m): 0.75 Resistencia de diseño (Ω): 18.771 Distancia max. entre SPT (m): 239.12 Longitud efectiva (opcional): Ip del rayo (kA): 43 Lang. efectiva (m): 48.8588 Resistencia (Ω): 18.425</p>

Topología	Dwight	NMX-549
<p>Tipo estrella 3 puntas</p>		
<p>Tipo estrella 4 puntas</p>		
<p>Tipo estrella 6 puntas</p>		

Topología	Dwight	NMX-549
<p>Tipo estrella 8 puntas</p>		
<p>Anillo perimetral</p>		

Fuente: Autor.

- Electrodos horizontales con mejoradores.**

A continuación, se presentan los resultados de resistencia para electrodos horizontales con recubrimiento de un material de baja resistividad, la implementación del mejorador se realiza con dimensiones de 0.3 m de ancho por 0.05 m de espesor recubriendo en su totalidad al cable. En la tabla Tabla 32 se los resultados de la computación de las diferentes ecuaciones descritas.

Tabla 32. Resultados RPT electrodo horizontal con tratamiento, mejorar existente.


Topología		Resistencia (Ω)
Electrodo horizontal Longitud cable		18.724 63 m
Contra-antena	En L Longitud cable	18.572 66 m
	2 brazos en cruz Longitud cable	18.607 73 m
	2 brazos en paralelo Longitud cable Separación de brazos	18.626 77 m 3 m
	3 brazos en paralelo Longitud cable	18.656 68 m
	4 brazos en paralelo Longitud cable	18.764 73 m
	6 brazos en paralelo Longitud cable	18.692 97 m
	8 brazos en paralelo Longitud cable	18.735 116 m

Fuente: Autor.




En la siguiente tabla se presenta los resultados del TOTAL GRID para el cálculo de resistencia, longitud efectiva y distancia máxima entre puestas a tierra.

En las contra-antenas la longitud total de cable introducido como dato de ingreso se debe dividir en el número de brazos que conforman la configuración.

Tabla 33. Resultados TOTAL GRID electrodo horizontal con tratamiento, mejorar existente.

Topología	Resistencia (Ω).
Electrodo horizontal	


Topología		Resistencia (Ω).
Contra-antena	En L	
	2 brazos en cruz	
	2 brazos en paralelo	

Topología	Resistencia (Ω).
3 brazos en paralelo	 <p>Cálculo conductor (contra-antenas)</p> <p>Seleccionar método: 3 BRAZOS EN PARALELO</p> <p>Resistencia de diseño (Ω): 18.771</p> <p>Ancho del tratamiento (m): 0.3</p> <p>Distancia max. entre SPT (m): 239.12</p> <p>Longitud del conductor (m): 66</p> <p>Profundidad de entranamiento (m): 0.75</p> <p>Longitud efectiva (opcional):</p> <p>Ip del rayo (kA): 43 Long. efectiva (m): 48.8598</p> <p>Resistencia (Ω): 18.666</p> <p>Calcular GENERAR REPORTE</p>
4 brazos en paralelo	 <p>Cálculo conductor (contra-antenas)</p> <p>Seleccionar método: 4 BRAZOS EN PARALELO</p> <p>Resistencia de diseño (Ω): 18.771</p> <p>Ancho del tratamiento (m): 0.3</p> <p>Distancia max. entre SPT (m): 239.12</p> <p>Longitud del conductor (m): 75</p> <p>Profundidad de entranamiento (m): 0.75</p> <p>Longitud efectiva (opcional):</p> <p>Ip del rayo (kA): 43 Long. efectiva (m): 48.8598</p> <p>Resistencia (Ω): 18.6171</p> <p>Calcular GENERAR REPORTE</p>
6 brazos en paralelo	 <p>Cálculo conductor (contra-antenas)</p> <p>Seleccionar método: 6 BRAZOS EN PARALELO</p> <p>Resistencia de diseño (Ω): 18.771</p> <p>Ancho del tratamiento (m): 0.3</p> <p>Distancia max. entre SPT (m): 239.12</p> <p>Longitud del conductor (m): 87</p> <p>Profundidad de entranamiento (m): 0.75</p> <p>Longitud efectiva (opcional):</p> <p>Ip del rayo (kA): 43 Long. efectiva (m): 48.8598</p> <p>Resistencia (Ω): 18.6171</p> <p>Calcular GENERAR REPORTE</p>

ELABORADO POR:
 Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
 soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación
 FECHA APROBACIÓN:

Topología		Resistencia (Ω).
	8 brazos en paralelo	

Fuente: Autor.

4.8. IEEE

Para la validación de esta sección de la herramienta computacional se realizará mediante la solución del ejemplo # 3 en el anexo B de la IEEE 80-2013, la solución entregada por el documento contempla el cálculo de la RPT de la rejilla por el método de Sverak, debido a ello se ejecutarán 3 metodologías diferentes para el cálculo de resistencia, observando los resultados obtenidos al ser realizados.

En el ejemplo se dispone de los siguientes datos iniciales.

- Resistividad del terreno: 400 Ω .m.
- Corriente de falla secundario: 6814 A.
- Corriente de falla primario: 3180 A.
- Relación X/R 0.001.
- Tiempo despeje de la falla: 0.5 s.
- Factor de decremento D_f : 1.0.
- Temperatura ambiente: 40 $^{\circ}$ C.
- Dimensiones de la subestación: 63 m x 84 m.
- Tipo de material de electrodos: acero recubierto de cobre con 30% de conductividad.
- Resistividad roca triturada (húmeda), tomado de la Tabla 10. 2500 Ω .m.
- Profundidad capa superficial: 0.102 m.
- Dimensiones de electrodos verticales: 38 varillas de 10 m de longitud.
- Profundidad de enterramiento del sistema: 0.5 m.

CASO DE ESTUDIO 1.

a. Paso 1. Selección del conductor.

Utilizando la ecuación (3-69) se encuentra el conductor idóneo para el proyecto.

$$A_{mm^2} = \frac{(6.814)}{\sqrt{\left(\frac{(3.85) \times 10^{-4}}{(0.5)(0.00378)(5.86)}\right) \ln\left(\frac{(245) + (1084)}{(245) + (40)}\right)}} = 29.45 \text{ mm}^2$$

El área calculada corresponde a un conductor con un radio de 3.1 mm, dicho conductor no es apto para ser utilizado como electrodo enterrado en el suelo, por motivos de esfuerzos mecánicos se estipula el cable 2/0 AWG con un radio de 5.25 mm como conductor mínimo para ser usado (IEEE Power and Energy Society, 2013).

b. Paso 2. Cálculo de tensiones tolerables.

Inicialmente se debe calcular el factor C_s mediante la ecuación (3-74).

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{(400)}{(2500)}\right)}{2(0.102) + 0.09} = 0.74$$

La tensión de paso tolerable se realiza para el criterio de 70 Kg, con la ecuación (3-72)

$$E_{p70} = \frac{0.157(1000 + 6(0.74)(2500))}{\sqrt{0.5}} = 2686.58 \text{ V}$$

La tensión de contactos tolerable se realiza para el criterio de 70 Kg, con la ecuación (3-73).

$$E_{t70} = \frac{0.157(1000 + 1.5(0.74)(2500))}{\sqrt{0.5}} = 838.17 \text{ V}$$

Adicionalmente, se calcula las tensiones tolerables para el criterio de 50 kg usando las ecuaciones (3-70) y (3-71).

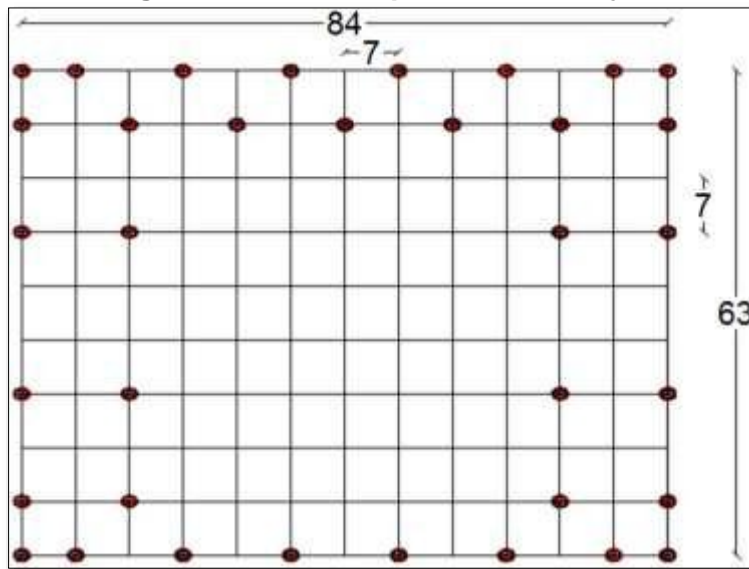
$$E_{p50} = \frac{0.116(1000 + 6(0.74)(2500))}{\sqrt{0.5}} = 1984.99 \text{ V}$$

$$E_{t50} = \frac{0.116(1000 + 6(0.74)(2500))}{\sqrt{0.5}} = 619.28 \text{ V}$$

c. Paso 3. Diseño preliminar.

Se presenta un diseño previo de un SPT compuesta por una malla de 84 m x 63 m, con cuadrículas internas de 7 m creando 10 conductores en paralelo al lado de 84 m y 13 conductores en paralelo al lado de 63 m, dando un total de 1659 m de conductor calibre 2/0 AWG, en conjunto a 38 electrodos verticales de 10 m de longitud cada uno y diámetro de 5/8".

Figura 4-13. Diseño preliminar de rejilla.



Fuente: (IEEE Power and Energy Society, 2013)

d. Paso 4. Determinar la resistencia de la rejilla.

En este primer ejercicio se realiza el cálculo de la RPT mediante la ecuación de Sverak (3-50)

$$R_G = (400) \frac{1}{(2039)} + \frac{1}{\sqrt{20(84 * 63)}} 1 + \frac{1}{1 + 0.5\sqrt{\frac{20}{(84 * 63)}}} = 2.62 \Omega$$

Donde L_t se determina con la ecuación (3-51).

$$L_t = 1659 + 38 * 10 = 2039 \text{ m}$$

e. Paso 5. Corriente Máxima en la rejilla I_G .

Para determinar la máxima corriente que circula en la malla al momento de una falla se utiliza la corriente del primario del transformador, a pesar de que la corriente del secundario es mayor, esta falla es local y no contribuye al GPR de la malla (IEEE Power and Energy Society, 2013). Se estipula un factor de división de corriente de 0.6, un factor de decremento de 1.0 y un factor de crecimiento de la malla de 1. El cálculo de la corriente máxima de falla está determinado por la ecuación (3-75).

$$I_G = (3180) * (1) * (0.6) * (1) = 1908 \text{ A}$$

f. Paso 6. Determinar el GPR.

El GPR se obtiene mediante la ecuación (3-75).

$$GPR = 1908 * 2.62 = 4998.96 \text{ V}$$

Al obtener el valor de GPR se debe comparar con la tensión de toque tolerable, de ser mayor el GPR se debe seguir con los siguientes pasos del procedimiento.

$$GPR = 4998.96 \text{ V} > E_{t50} = 838.2 \text{ V}$$

GPR es mayor a E_{t50} por ello se debe seguir con los cálculos de las tensiones reales.

g. Paso 7. Cálculo de tensiones reales.

Usando la ecuación (3-83), ecuación (3-84), ecuación (3-85) y la ecuación se computa los siguientes resultados

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

$K_{ii} = 1$, debido a la existencia de varillas en la malla.

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} = \sqrt{1 + \frac{(0.5)}{(1)}} = 1.22 \text{ Para } h_0 = 1\text{m}$$

La variable n se obtiene con la ecuación (3-86) y la ecuación (3-87)

$$n = n_a * n_b * n_c * n_d = (11.286) * (1.005) * (1) * (1) = 11.40$$

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p} = \frac{2(1659)}{(2 * 84 + 2 * 63)} = 11.29 ; n_b = \frac{\sqrt{L_p}}{4\sqrt{A}} = \frac{\sqrt{(2 * 84 + 2 * 63)}}{4\sqrt{(84 * 63)}} = 1.01$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{(7)^2}{16(0.5)(0.01)} + \frac{((7) + 2(0.5))^2}{8(7)(0.01)} - \frac{(0.5)}{4(0.01)} \right) + \frac{(1)}{1.225} \ln \left(\frac{8}{\pi(2(11.342) - 1)} \right) \right]$$

$$K_m = 0.77$$

Se debe calcular el factor K_i mediante la ecuación (3-88).

$$K_i = 0.644 + 0.148n = 0.644 + 0.148(11.342) = 2.33$$

Mediante la ecuación (3-82) encontramos el valor de las tensiones de paso reales.

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_M} = \frac{(400) \cdot (1908) \cdot (0.77) \cdot (2.323)}{(2292.15)} = 597.37 \text{ V}$$

La variable L_M se calcula mediante la ecuación (3-90)

$$L_M = L_c + [1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_X^2 + L_Y^2}} \right)] L_R = (1659) + [1.55 + 1.22 \left(\frac{(10)}{\sqrt{(84)^2 + (63)^2}} \right)] (380) =$$

$$L_M = 2292.15$$

La computación del valor de las tensiones de paso del ejercicio se realiza mediante la ecuación (3-91).

$$E_S = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_S \cdot K_i}{L_S} = \frac{(400) \cdot (1908) \cdot (0.406) \cdot (2.323)}{(1567.25)} = 465.20 \text{ V}$$

El factor L_S se obtiene mediante la formula (3-92).

$$L_S = 0.75L_C + 0.85L_R = 0.75(1659) + 0.85(380) = 1567.25$$

Mediante la ecuación (3-93) se tiene el valor de la variable K_S .

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{(7) + (0.5)} + \frac{1}{(7)} (1 - 0.5^{(11.342)-2}) \right]$$

$$K_S = 0.41$$

h. Comparaciones entre tensiones tolerables y reales.

Por último, se realiza una comparación entre las tensiones tolerables y las tensiones reales, para dar el concepto de diseño aprobado o no, según se especifica en la Tabla 16.

Tabla 34. Criterio de aprobación caso 1.

Tensiones tolerables	Condición	Tensiones de malla	Cumple
Paso	>	GPR	No cumple
Contacto	>	GPR	No cumple
Paso	>	Paso	Cumple
Contacto	>	Contacto	Cumple

Fuente: Autor

El diseño es cumple con los requisitos para ser una protección de las personas en la subestación. A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante la herramienta computacional TOTAL GRID, para el ejercicio 1 calculando la resistencia mediante la ecuación de Sverak.

Debido a que en el ejercicio planteado por la el factor de decremento se estipula con un valor de 1, para lograr esta magnitud se debe ingresar un valor muy cercano a cero, por ejemplo 0.001 para la relación X/R adicionalmente una frecuencia del sistema de 60 Hz.

La herramienta computacional al sesgar cualquier conductor inferior a un calibre 1/0 AWG, se realiza una selección manual del conductor 2/0 AWG, para tener congruencia con el análisis realizado anteriormente.

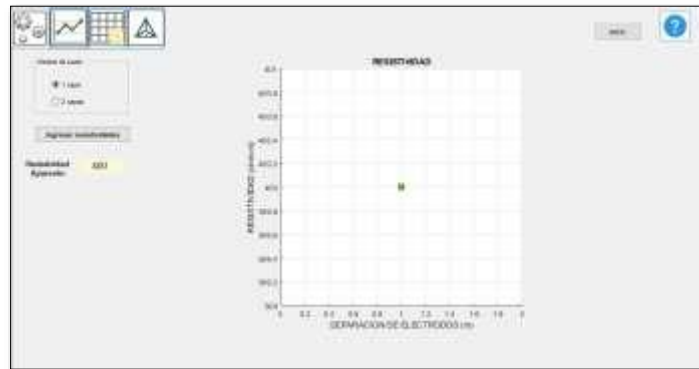
Figura 4-14. Primer panel IEEE, caso 1



Fuente: Autor.

En el segundo panel se ingresa una sola medida de resistividad con el valor de 400 Ω .m, como lo determina el ejercicio propuesto por la ANSI/IEEE-80 en su versión 2013.

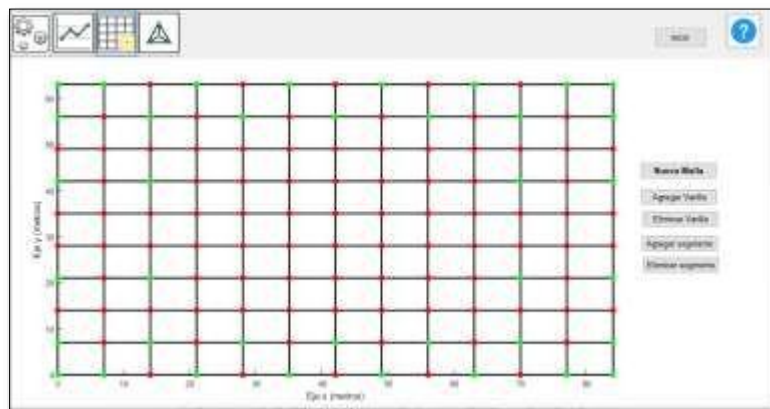
Figura 4-15. Segundo panel IEEE, caso 1.



Fuente: Autor.

En el panel 3 se ingresa las características de la rejilla de puesta a tierra como se determina en el ejercicio, 38 varillas de 10 m de longitud con diámetro de 5/8" como lo muestra la Figura 4-16, una malla de 84 m x 63 m con separaciones de 7 m en la retícula interna a una profundidad de 0.5 m, dando 10 conductores en paralelo al lado mayor y 13 conductores en paralelo al lado menor ver Figura 4-17

Figura 4-16. Tercer panel IEEE, caso 1.



Fuente: Autor.

Figura 4-17. Datos ingreso rejilla, caso 1

The screenshot shows a data input form titled 'Panel'. It contains the following fields and controls:

- X: 84
- Y: 63
- Z: 0.5
- Conductores en paralelo (Nx): 10
- Conductores en paralelo (Ny): 13
- Malla en L
- Guardar

Fuente: Autor.

En el cuarto panel se selecciona, la opción de calcular la resistencia mediante la ecuación de Sverak y se ingresan los valores de la resistividad del material de la capa superior para el cálculo de las tensiones tolerables. El ejercicio estipula un valor de un valor del factor S_f de 0.6, por ello se hace necesario ingresar un valor de 3.93Ω de impedancia en paralelo a la subestación.

Figura 4-18. Cuarto panel IEEE, caso 1.



The screenshot shows a software interface with four main panels:

- CÁLCULO DE RESISTENCIA:** Método: Sverak, Rg (Ω): 2.619, CALCULAR.
- TENSIONES TOLERABLES:** ps (Ωm): 2500, hs (m): 0.102, criterio: 70 Kg (selected), Tensión de toque (V): 840.548, Tensión de paso (V): 2696.1, CALCULAR.
- TENSIONES REALES:** GPR (V): 4997.83, Subestación: Alta tensión (selected), Tensión de toque (V): 586.184, Tensión de paso (V): 459.507, CALCULAR.
- RESULTADOS:** DISEÑO VALIDO PARA IMPLEMENTACIÓN, VALIDACIÓN, GENERAR REPORTE.

Fuente. Autor.

CASO DE ESTUDIO 2.

Para este apartado se realiza la réplica del ejercicio anteriormente expuestos, con el cambio de la metodología de calcular la resistencia de la malla por las ecuaciones de Schwarz.

a. Paso 1. Selección del conductor.

La selección del conductor no tiene cambios con respecto al ejercicio anterior, es decir, se ha seleccionado un conductor desnudo 2/0 AWG.

b. Paso 2. Cálculo de tensiones tolerables.

Para las tensiones tolerables, al no realizarse cambios a los datos iniciales permanecen igual, es decir.

$$E_{p70} = 2686.58 \text{ V.}$$

$$E_{t70} = 838.17 \text{ V.}$$

$$E_{p50} = 1985.99 \text{ V.}$$

$$E_{t50} = 619.28 \text{ V.}$$

c. Paso 3. Diseño preliminar.

El diseño de la rejilla permanece sin cambios al ejercicio anterior, los detalles se observan en la Figura 4-13.

d. Paso 4. Determinar la resistencia de la rejilla.

Para estipular el valor de resistencia de la malla se hace la computación de la metodología de Schwarz la cual determina la resistencia individual de los conductores horizontales, los conductores verticales y la influencia al combinar estos dos tipos de electrodos en un mismo arreglo de puesta a tierra (Schwarz, 1954).

La RPT de la rejilla se encuentra estipulada por la ecuación (3-52)

$$R_G = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} = \frac{(2.761)(2.811) - (2.460)^2}{(2.761) + (2.811) - 2(2.460)} = 2.62 \Omega$$

Donde R_1 se obtiene mediante la ecuación (3-53), R_2 con la ecuación (3-56) y R_m por medio de la ecuación (3-57).

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{\sqrt{2bh}} \right) + \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right] = \frac{(400)}{\pi(1659)} \left[\ln \left(\frac{2(1659)}{\sqrt{2(0.005)(0.5)}} \right) + \frac{(1.357)(1659)}{\sqrt{(5292)}} - (5.7) \right]$$

$$R_1 = 2.77 \Omega$$

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n L_v} \left[\ln \left(\frac{4L_v}{b} \right) - 1 + \frac{2K_1 L_v (\sqrt{n_v} - 1)^2}{\sqrt{A}} \right] = \frac{\rho}{2\pi(38)(10)} \left[\ln \left(\frac{4(10)}{(0.0159)} \right) - 1 + \frac{2(1.357)(10)(\sqrt{(38)} - 1)^2}{\sqrt{(5292)}} \right]$$

$$R_2 = 2.81 \Omega$$

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{L_v} \right) + \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] = \frac{(400)}{\pi(1659)} \left[\ln \left(\frac{2(1659)}{(10)} \right) + \frac{(1.357)(1659)}{\sqrt{(5292)}} - (5.2) + 1 \right]$$

$$R_m = 2.46 \Omega$$

Debido a que la profundidad de enterramiento es menor a $0.1 \cdot \sqrt{\text{Área}}$, los factores K_1 y K_2 se calculan mediante las ecuaciones (3-54) y (3-55) respectivamente,

$$K_1 = -0.04 \frac{L_x}{L_y} + 1.41 = -0.04 \frac{(84)}{(63)} + 1.41 = 1.36$$

$$K = 0.15 \frac{L_x}{L_y} + 5.5 = 0.15 \frac{(84)}{(63)} + 5.5 = 5.70$$

e. Paso 5. Corriente Máxima en la rejilla I_G.

La máxima corriente que circulara en la malla al momento de falla no ha sido afectada en el ejercicio, su valor es de.

$$I_G = 1980 A$$

f. Paso 6. Determinar el GPR.

El gradiente de tensión en la malla se calcula con la ecuación (3-75).

$$GPR = 1908 * 2.622 = 5018.04 V$$

g. Paso 7. Cálculo de tensiones reales.

Los valores de los factores K_m y K_i se toman del ejercicio anterior, ya que no han tenido variación. Mediante la ecuación (3-82) encontramos el valor de las tensiones de paso reales.

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_M} = \frac{(400) \cdot (1908) \cdot (0.77) \cdot (2.622)}{(2292.15)} = 589.61 V$$

La variable LM se calcula mediante la ecuación (3-90).

$$L_M = L_c + [1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right)] L_R = (1659) + [1.55 + 1.22 \left(\frac{(10)}{\sqrt{(84)^2 + (63)^2}} \right)] (380) =$$

$$L_M = 2292.15$$

La computación del valor de las tensiones de paso del ejercicio se realiza mediante la ecuación (3-91)

$$E_S = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_S \cdot K_i}{L_S} = \frac{(400) \cdot (1908) \cdot (0.406) \cdot (2.323)}{(1567.25)} = 465.20 V$$

El factor L_S se obtiene mediante la formula (3-92).

$$L_S = 0.75L_C + 0.85L_R = 0.75(1659) + 0.85(380) = 1567.25$$

Mediante la ecuación (3-93) se tiene el valor de la variable K_S.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{(7) + (0.5)} + \frac{1}{(7)} (1 - 0.5^{(11.342)-2}) \right]$$

$K_s = 0.41.$

h. Comparaciones entre tensiones tolerables y reales.

En el caso de estudio actual se obtuvieron resultados similares al primer caso, es por ello que se tienen las mismas conclusiones frente al criterio de aprobación del caso 1, como se puede ver en la Tabla 35.

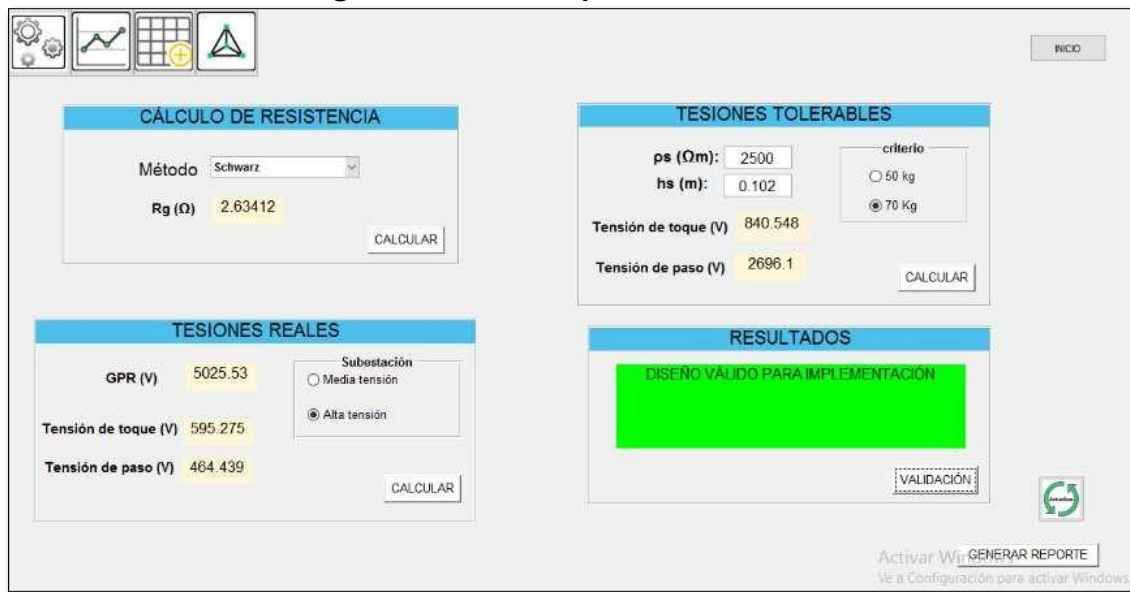
Tabla 35. Criterio de aprobación caso 2.

Tensiones tolerables	Condición	Tensiones de malla	Cumple
Paso	>	GPR	No cumple
Contacto	>	GPR	No cumple
Paso	>	Paso	Cumple
Contacto	>	Contacto	Cumple

Fuente: Autor.

En la siguiente imagen se presenta los resultados utilizando el TOTAL GRID.

Figura 4-19. Cuarto panel IEEE, caso 2.



Fuente: Autor.

CASO DE ESTUDIO 3.

Para el presente caso se realiza la implementación de materiales de baja resistividad para el mejoramiento de SPT en el primer caso de estudio. Indicando los resultados de aumentar artificialmente la sección transversal de los conductores enterrados en el suelo.

a. Paso 1. Cálculo del conductor.

La implementación de materiales mejoradores de puestas a tierras, en ningún caso reemplaza el uso de electrodos de puesta a tierra, ni exime al diseñador de calcular el conductor más idóneo para poder disipar la energía producida al momento de una falla.

Tomando en consideración los cálculos realizados en el caso 1, se selecciona como conductor un cable 2/0 AWG. Las dimensiones con las cuales se implementará el mejorador son 0.3 m de ancho con un espesor de 0.05 m para todo el recorrido del cable como lo muestra la Figura 4-5.

La sección transversal del mejorador es un rectángulo con las dimensiones dadas, con el área creada se puede hacer una equivalencia a un conductor redondo de radio r_0 , como se muestra en la Figura 3-16.

En el documento *Earthing grid parameter with conductor surrounded by an additional substance* (Kurtovic & Vujevic, 2000), se presenta la metodología para determinar el radio equivalente de un conductor de radio r_1 revestido con un material de baja resistividad y constante en el tiempo. Mediante la ecuación (4-4) se obtiene el radio equivalente de un conductor con material artificial.

$$R_{equ} = r_1 * \left(\frac{r_0}{r_1}\right)^{1-\frac{\rho_1}{\rho_2}} \quad (4-4)$$

$$r_0 = \sqrt{\frac{b * d}{\pi}} \quad (4-5)$$

$$r_0 = \sqrt{\frac{b * d}{\pi}} = \sqrt{\frac{0.3 * 0.05}{\pi}} = 0.0691 \text{ m}$$

$$R_{equ} = r_1 * \left(\frac{r_0}{r_1}\right)^{1-\frac{\rho_1}{\rho_2}} = (0.00503) * \left(\frac{0.0691}{(0.00503)}\right)^{1-\frac{0.048}{400}} = 0.06908 \text{ m}$$

Donde:

ρ_1 = Resistividad del material mejorador ($\Omega.m$).

ρ_2 = Resistividad aparente del suelo ($\Omega.m$).

r_1 = Radio del conductor (m).
 r_0 = Radio del recubrimiento (m).

b. Paso 2. Cálculo de tensiones tolerables.

La aplicación de aditivos químicos para mejorar la resistencia de los sistemas de puesta a tierra no influye en el cálculo de las tensiones tolerables, es por ello las amplitudes de dichas tensiones siguen siendo iguales a las expuestas en el caso 1.

c. Paso 3. Diseño preliminar.

El diseño de la rejilla permanece igual a los casos anteriores, es decir, una rejilla de 84 m x 63 m con 38 varillas de 10 m de largas, distribuidas tanto en la periferia de la rejilla como en la periferia de la misma.

d. Paso 4. Determinar la resistencia de la rejilla.

El cálculo de la resistencia para este caso se realiza mediante la ecuación de H.B. Dwight.(3-22).

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \left(\frac{2L}{r} \right) + \ln \left(\frac{L}{H} \right) - 2 \frac{2H}{L} - \frac{H^2}{L^2} + \frac{H^4}{2L^4} \right)$$

$$R_G = \frac{(400)}{2\pi(1659)} \left(\ln \left(\frac{2(1659)}{(0.06908)} \right) + \ln \left(\frac{1659}{(0.5)} \right) - 2 + \frac{2(0.5)}{(1659)} - \frac{(0.5)^2}{(1659)^2} + \frac{(0.5)^4}{2(1659)^4} \right) = 0.5565$$

e. Paso 5. Corriente Máxima en la rejilla I_G .

En el caso 1 se estipula un valor de 3.93 Ω como impedancia equivalente de las líneas tanto de ingreso como las líneas que salen de la subestación, con el valor antes mencionado y la resistencia del paso anterior se obtiene el actor S_f mediante la ecuación (3-80).

$$S_{f(x/y)} = \left| \frac{Z_{eq(x/y)}}{R_g + Z_{eq}} \right| = \left| \frac{3.93}{0.5565 + 3.93} \right| = 0.88$$

Con la variación de este valor se recalcula I_G .

$$I_G = (3180) * (1) * (0.88) * (1) = 2798.4 A$$

f. Paso 6. Determinar el GPR.

El GPR se obtiene mediante la ecuación (3-75).

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO Y
PRÁCTICA

VERSIÓN: 01

$$GPR = 2798.4 * 0.5565 = 1557.31 V$$

Se debe hacer la comparación del GPR con las tensiones tolerables, de ser el GPR el de menor valor el diseño es aprobado directamente.

$$GPR = 1557.31 V > E_{s50} = 2686.58 V$$

$$GPR = 1557.31 V > E_{t50} = 838.2 V$$

Al realizar la comparación de del GPR con las tensiones de paso tolerables, se deduce una protección del personal en la subestación, pero al realizar la comparación con las tensiones de contacto, se observa que no se da protección al personal. Es por ello que se debe realizar los cálculos de tensiones reales.

g. Paso 7. Cálculo de tensiones reales.

Usando la ecuación (3-83), ecuación (3-84), ecuación (3-85) y la ecuación se computa los siguientes resultados

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

$K_{ii} = 1$, debido a la existencia de varillas en la malla.

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} = \sqrt{1 + \frac{(0.5)}{(1)}} = 1.22 \text{ para } h_0 = 1m$$

La variable n se obtiene con la ecuación (3-86) y la ecuación (3-87)

$$n = n_a * n_b * n_c * n_d = (11.286) * (1.005) * (1) * (1) = 11.40$$

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p} = \frac{2(1659)}{(2 * 84 + 2 * 63)} = 11.29; n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} = \sqrt{\frac{(2 * 84 + 2 * 63)}{4\sqrt{(84 * 63)}}} = 1.01$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{(7)^2}{16(0.5)(0.13816)} + \frac{((7) + 2(0.5))^2}{8(7)(0.13816)} - \frac{(0.5)}{4(0.13816)} \right) + \frac{(1)}{1.225} \ln \left(\frac{8}{\pi(2(11.342) - 1)} \right) \right]$$

$$K_m = 0.35$$

Se debe calcular el factor Ki mediante la ecuación (3-88).

$$K_i = 0.644 + 0.148n = 0.644 + 0.148(11.342) = 2.33$$

Mediante la ecuación (3-82) encontramos el valor de las tensiones de paso reales.

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_M} = \frac{(400) \cdot (2798.4) \cdot (0.35) \cdot (2.33)}{(2292.15)} = 398.25 \text{ V}$$

La variable LM se calcula mediante la ecuación (3-90)

$$L_M = L_C + [1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_X^2 + L_Y^2}} \right)] L_R = (1659) + [1.55 + 1.22 \left(\frac{(10)}{\sqrt{(84)^2 + (63)^2}} \right)] (380) =$$

$$L_M = 2292.15$$

La computación del valor de las tensiones de paso del ejercicio se realiza mediante la ecuación (3-91).

$$E_S = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_S \cdot K_i}{L_S} = \frac{(400) \cdot (1908) \cdot (0.406) \cdot (2.323)}{(1567.25)} = 682.29 \text{ V}$$

El factor L_S se obtiene mediante la formula (3-92).

$$L_S = 0.75L_C + 0.85L_R = 0.75(1659) + 0.85(380) = 1567.25$$

Mediante la ecuación (3-93) se tiene el valor de la variable K_S.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{(7) + (0.5)} + \frac{1}{(7)} (1 - 0.5^{(11.342)-2}) \right]$$

$$K_S = 0.41$$

h. Comparaciones entre tensiones tolerables y reales.

Al terminar los cálculos previos se realiza las comparaciones de entre las tensiones soportables, el GPR y las tensiones reales, como se muestra en la Tabla 36.

Tabla 36. Criterio de aprobación caso 3.

Tensiones tolerables	Condición	Tensiones de malla	Cumple
Paso	>	GPR	Cumple
Contacto	>	GPR	No cumple
Paso	>	Paso	Cumple
Contacto	>	Contacto	Cumple

Fuente: Autor.

En primera instancia, las tensiones de paso tolerables están por debajo del GPR, pero al comparar las tensiones de contacto con el GPR no cumple la condición de ser las primeras mayores, es por ello que se requiere calcular y posteriormente analizar las tensiones tolerables y las reales. en la última comparación entre las tensiones se concluye que el proyecto es viable y puede pasar a proceso de refinamiento del diseño.

En la Figura 4-20 se muestra el primer panel de la sección IEEE, en donde al seleccionar la opción de mejorador SPT, se despliegan las celdas de ingreso de las dimensiones de aplicación de un mejorador de puesta a tierra. Por último, al calcular la resistencia mediante la opción de la ecuación para conductor horizontal en el cuarto panel se tendrán los resultados de la implementación del material químico en la malla a diseñar, como se muestra en la Figura 4-21.

Figura 4-20. Primer panel IEEE, caso3.

Fuente: Autor.

Figura 4-21. Cuarto panel IEEE, caso 3.

Fuente: Autor.

En la Tabla 37 se muestran los datos de los cuatro (4) casos que se analizan en el anexo B de (IEEE Power and Energy Society, 2013), el primer caso muestra un SPT con un área de 70x70 m, el segundo en donde se adicionan 20 varillas de 10 m de longitud, el tercer caso se presenta una rejilla de 84x63 m con 34 electrodos distribuidos en la rejilla, por último se presenta un SPT con una configuración en forma de L con un lado mayor de 105 m y un lado menor de 70 m y ancho de brazos de 35 m.

En la Tabla 38 se entregan los resultados de los casos presentados realizando los cálculos con la interfaz gráfica. Para cada uno de los casos se calculó la resistencia mediante las metodologías de Sverak, Schwarz y aplicando mejorador de puesta a tierra, en conjunto con los cambios en las tensiones debido a los métodos de análisis.

Tabla 37. Datos ingreso casos IEEE 80 version 2013.

Caso	Dimensión (m)	ρ ($\Omega \cdot m$)	D (m)	h (m)	Conducto r 2/0 AWG	Varillas 10m x 5/8"	Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)	t_s (s)	h_s (m)	ρ_s ($\Omega \cdot m$)
1	70x70	400	7	0.5	1540	N/A	40	0.5	0.102	2500
2	70x70	400	7	0.5	1540	20	40	0.5	0.102	2500
3	84x63	400	7	0.5	1659	34	40	0.5	0.102	2500
4	L(105x70) P (35,35)	400	7	0.5	1575	24	40	0.5	0.102	2500

Fuente: (IEEE Power and Energy Society, 2013).

Tabla 38. Resultados casos IEEE-80 mediante TOTAL GRID.

Caso	Método	Resistencia (Ω)	Tensiones tolerables (V)		GPR (V)	Tensiones reales (V)		Aprobación
			Contacto	Paso		Contacto	Paso	
1	Sverak	2.776	840.648	2696.1	5173.4	967.621	595.543	No aprobado
	Schwarz	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Mejorador	0.71357	840.648	2696.1	1920.46	748.884	860.052	Aprobado
2	Sverak	2.746	840.648	2696.1	5140.48	691.487	521.467	Aprobado
	Schwarz	2.83138	840.648	2696.1	5233.38	682.755	514.882	Aprobado
	Mejorador	0.640481	840.648	2696.1	1751.31	468.784	761.695	Aprobado
3	Sverak	2.619	840.648	2696.1	4997.82	586.182	459.506	Aprobado
	Schwarz	2.62149	840.648	2696.1	5000.67	585.959	459.331	Aprobado
	Mejorador	0.556458	840.648	2696.1	1550.06	394.6	670.753	Aprobado
4	Sverak	2.736	840.648	2696.1	5129.45	696.009	537.291	Aprobado
	Schwarz	2.76791	840.648	2696.1	5164.55	692.693	534.731	Aprobado
	Mejorador	0.616974	840.648	2696.1	1695.76	463.642	787.684	Aprobado

Fuente: Autor.

5. CONCLUSIONES

El éxito de un sistema de puesta a tierra depende de seleccionar el correcto método de diseño a utilizar dependiendo de la finalidad de la puesta a tierra y obtener los datos iniciales precisos del proyecto a diseñar. Datos como la resistividad aparente del terreno deben realizarse en circunstancias ideales para evitar errores de diseño, debido a que la resistividad del terreno puede ser influenciada por factores como lo son la temperatura del terreno, la compactación y en gran medida por la humedad del terreno.

La variedad de electrodos de puesta a tierra que existen en conjunto con las diferentes topologías de diseño presentan múltiples ecuaciones con las cuales se obtendrá el valor de RPT que se encuentre dentro de los valores estipulados por los reglamentos o estándares para la disipación correcta y eficiente de la energía creada al momento de una falla eléctrica.

TOTAL GRID es creado mediante programación realizada en el software MATLAB, MATLAB permite la creación de programas con base matemáticas con ecuaciones o programación compleja, mediante el uso de un lenguaje propio. Este lenguaje puede ser visto y puede ser ejecutado mediante un archivo de script (archivo .m), a través de operaciones vectoriales, matriciales, de funciones y algoritmos complejos de cálculo.

La herramienta presenta diferencias de resultados en la metodología IEEE-80 con respecto a los resultados presentes en el estándar, esto se debe a las aproximaciones en los decimales en los ejemplos que se muestran en los anexos del estándar.

Se concluye la gran importancia de la herramienta computacional TOTAL GRID, para el cálculo de sistemas de puesta a tierra no solo por el algoritmo de diseño del estándar ANSI/IEEE_80, sino para calcular la RPT para diferentes configuraciones de electrodos de puesta a tierra. La combinación del uso del software con el presente documento se estipula como una guía para la introducción de los estudiantes en el estudio de los sistemas de puesta a tierra; para el uso a nivel empresarial se presenta una herramienta computacional, donde el usuario encontrará un compilado de ecuaciones para el cálculo de SPT en un mismo software.

Las ecuaciones de Sverak y de Schwarz descritas en el estándar IEEE-80 se basan fundamentalmente en el área que recubre la rejilla en el terreno, es por ello que se tiene una reducción de hasta un 11 % cuando se aumenta en un 120% la cantidad de cable en una misma área de implementación, en comparación del 30% que se ve reducida la RPT al ampliar el área de implementación de la malla con la misma cantidad de cable usado inicialmente.

Al recubrir los electrodos con material de baja resistividad, el cálculo de RPT mediante otras metodologías arroja una reducción 56% en el primer caso, 76% con respecto al caso

de aumento de la cantidad de conductor y un 36% versus cuando se maximiza el área de cobertura de la rejilla.

La implementación de materiales de baja resistividad recubriendo los electrodos de las mallas, en el estándar ANSI/IEEE-80 ayuda en la reducción de las tensiones reales de malla al momento de una falla, con ello se permite una mayor protección a las personas dentro de la subestación y en su periferia. Adicionalmente, al aumentar artificialmente la sección transversal se obtiene mayor área de contacto de la malla con el terreno, produciendo con ello la disminución del tiempo en ser despejado las fallas del sistema, es por esto que se obtienen mayor protección de los equipos de la subestación aumentando su vida útil.

La implementación de materiales de baja resistividad en electrodos verticales se puede obtener una reducción de RPT entre un 30% y 34%, dependiendo de la metodología de cálculo con la cual sea comparada. En cuanto al uso de material mejorador de puesta a tierra en electrodos horizontales se puede obtener una reducción de hasta un 22%, con respecto al uso de SPT exclusivamente de cable.

En Colombia una de las practicas más comunes en proyectos eléctricos es el de disponer de diseños típicos de puesta a tierra, como por ejemplo los SPT en transformadores de distribución, consistente en una jabalina para conectar los DPS del equipo, esta práctica incurre en errores de procedimiento de diseño y construcción al presentar mayores esfuerzos en situaciones donde la RPT son de valores mayores a los exigidos por el RETIE. Por lo anterior mencionado es importante en los proyectos la realización de medidas de resistividad en los sitios de construcción de las puestas a tierra, en conjunto con la selección de la mejor topología de electrodos a implementar dependiendo del proyecto a ejecutar.

6. RECOMENDACIONES

El autor recomienda como proyectos el análisis de la eficacia de la disipación de corrientes de falla en electrodos verticales y horizontales, con base a la teoría que dicta que las corrientes de falla al tener una componente de frecuencia, su conducción en el suelo puede verse como una propagación horizontal debido al efecto pelicular.

Estudio sobre el comportamiento de los sistemas de puesta a tierra, cuando se presenta una disipación de corriente de falla con referencia a los modelamientos de terreno que se tienen (suelo homogéneo, dos capas, multicapas).

Para el software TOTAL GRID se recomienda incorporar una interfaz que permita importar archivos con extensiones, creadas por herramientas usadas en la industria eléctrica como lo puede ser el AUTOCAD con extensiones DXF, pudiendo con ello ingresar de forma más eficiente diseños más complejos y reales. Por último, adicionar una programación que realice un renderizado del diseño de las mallas, para visualizar las componentes de tensiones creadas en momentos de falla mediante el análisis con el método de elementos finitos.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asdrúbal, J., & Omar, C. (2003). Cálculo de la malla de puesta a tierra de una subestación. *Scientia et Technica año IX*, (22), 37–42.
- ASTM, I. (2001). Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method 1. *Current*, (Reapproved), 2–6.
- Basilio, A., & Romero, Y. (2015). *Estudio Técnico Del Análisis De La Corrosión En Sistemas De Puesta a Tierra*. Recuperado de https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/18555/tesis_ABG_YRR.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Bentocol. (2017). Bentonitas| Colombia | Bentonta. Recuperado el 14 de febrero de 2020, de <https://bentocol.wixsite.com/bentocol-sas>
- Carpenter, R., & Lanzoni, J. (2007). Designing For A Low Resistance Earth Interface (Grounding), 16.
- Celec, C. (2019). Cemento conductivo para puesta a tierra CELEC / CELEC DE COLOMBIA S.A.S. Recuperado el 17 de febrero de 2020, de <https://cementocelec.com/es>
- CENTELSA S.A. (2017). *Manual Del Electricista*. Recuperado de www.centelsa.com
- Chisholm, W. A., Petrache, E., & Bologna, F. (2009). Comparison of Low Frequency Resistance and Lightning Impulse Impedance on Transmission Towers. *International Symposium on Lightning Protection (SIPDA)*, 329–334.
- Compusoftwareusco. (2014). Fuente de poder Polo a tierra. Recuperado el 14 de febrero de 2020, de <https://compusoftwareusco.webnode.com.co/novedades/hardware/fuente-de-poder-polo-a-tierra/>
- DEHN. (2014). *Lightning Protection. Electric Power Distribution Handbook*. <https://doi.org/10.1201/b16747-13>
- Duche, E., & Miñan, W. (2013). *Diseño del sistema de puesta a tierra de la estación repetidora el Alisal para sistemas de telecomunicaciones de movistar*.
- Dwight, H. (1936). Calculation of Resistances to Ground. *Electrical Engineering*, (December).
- Ematecs. (2020). Tabla de distribución de probabilidades de la normal estándar. Recuperado de <https://ematecs.com/tabla-de-probabilidades-de-la-distribucion-normal/>
- Garcés, A., Granada, M., & Gallego, R. (2004). Flujo De Carga Trifásico Para Sistemas Radiales De Distribución. *Scientia et Technica*, 1(24), 19–24. <https://doi.org/10.22517/23447214.7289>
- García, R. (1999). *La Puesta A Tierra De Instalaciones Electricas (MARCOMBO)*. Barcelona, España.
- Gómez, H., Velilla, E., Moreno, G., & Valencia, J. (2006). Respuesta transitoria de las puestas a tierra en la protección contra rayos. *Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia*, 36, 21–32. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302006000200002&lang=pt
- González, F. M. (2005). *Sistemas de Puesta a Tierra: Una introducción a la Seguridad*.

- Seminario: seguridad eléctrica en la industria y riesgos en la empresa, 1–2.*
Recuperado de <http://www.giaelec.org.ve/Articulos/A2005-04.pdf>
- Güemes, J. A., Hernando, F. E., Rodríguez, F., & Ruiz, J. M. (2006). A practical approach for determining the ground resistance of grounding grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21(3), 1261–1266. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.874121>
- He, J., Zeng, R., & Zhang, B. (2012). *Methodology and Technology for Power System Grounding. Methodology and Technology for Power System Grounding.* <https://doi.org/10.1002/9781118255001>
- ICONTEC. (2008). NTC 4552 Protección contra Rayos. *Ntc 4552, Primera Ac(571)*, 45. Recuperado de https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCgQFjAA&url=http://destec-corp.com/download/49/&ei=0K0MU8-TMunP0wGH3YDIAG&usg=AFQjCNHQ0-NIAqn70czwB_akBRquWXtjwQ&cad=rja
- IEEE Power and Energy Society. (2012). *Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System.* IEEE Power and Energy Society (Vol. 2012).
- IEEE Power and Energy Society. (2013). *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015).* <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2015.7109078>
- ILCE. (2007). Corrosión en suelos. Recuperado el 10 de febrero de 2020, de http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_10.htm
- INCE LTDA, "Industria Nacional de Conductores Eléctricos ". (2018). Centelsa – Cables de energía y telecomunicaciones. Recuperado el 7 de mayo de 2020, de <http://www.centelsa.com/>
- Kurtovic, M., & Vujevic, S. (2000). Earthing grid parameters with conductor surrounded by an additional substance. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and ...*, 147(3), 57–61. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd>
- Laurent, R., Martins, A., & Helou, C. (2010). Puesta a Tierra en Subestaciones de Distribuciones : ¿ Unidas o Separadas ?
- Lee, C.-Y., & Wang, S.-R. (2009). A study of grounding grid characteristics with conductive concrete. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 36, 24–29. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1331431>
- Liberal, V. (2016). Embalse de Bucaramanga visto desde las alturas. Recuperado el 24 de abril de 2020, de <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/embalse-de-bucaramanga-visto-desde-las-alturas-BDVL357987>
- Lyncolespañol. (2011). Lyncole Latam Blog. Recuperado el 14 de febrero de 2020, de <https://lyncolespanol.com/2011/05/22/?quiere-ganar-31-con-su-inversion/>
- Malagón, G., Giraldo, W., Ordoñez, G., & Chacón, J. C. (2015). Prácticas CEM enfocadas en la mitigación del Impulso Electromagnético del Rayo (IER): Earthing and Bonding; un enfoque de la IEC 62305. *Revista Tecnología en Marcha*, 26(4), 13. <https://doi.org/10.18845/tm.v26i4.1577>
- Manani, C. (2013). *Sistema de puesta a tierra y protección equipotencial para sistemas de cómputo.* Universidad Nacional del Centro del Perú. Recuperado de <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/2970/Mamani>

- Huayane.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Marungsri, B., Boonpoke, S., Rawangpai, A., Oonsivilai, A., & Kritayakornupong, C. (2009). Study of Tower Grounding Resistance Effected Back Flashover to 500 kV Transmission Line in Thailand by using ATP/EMTP. *International Journal of Energy and Power Engineering*, 2(6), 2.
- Montaña, J. (2011). Recommendations for grounding systems in lightning protection systems. *Ingenieria e Investigacion*, 31(2 SUPPL.), 5–10. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092011000500002&lang=pt
- Montesdeoca, E. O. (1996). Estimación de corrientes de cortocircuito en sistemas radiales de distribución., 358.
- Normas ANCE. (2005). NMX-J-549-ANCE-2005.
- Ontario, R. (2000). Ontario Regulation 558/00, 23(2), 1–56. Recuperado de <https://www.aimsconsulting.com/wp-content/uploads/2017/05/Ontario-Regulations-558-00.pdf>
- Orrego, H. L., & Tabares, L. M. (2007). *Análisis de la metodología box cox para medir la resistividad del terreno*. <https://doi.org/10.2320/materia.46.171>
- Pacheco, Á., & Jiménez, J. (2013). *Diseño De Sistemas De Puesta a Tierra Partiendo De Un Modelo Biestratificado De Terreno, Aplicando Un Software Computacional En El Sector Industrial*. Recuperado de <http://159.90.80.55/tesis/000133709.pdf>
- Pillajo, G. J. (2013). *Diagnóstico y propuesta de mejoramiento del sistema de puesta a tierra existente en el laboratorios del centro de metrología del ejército ecuatoriano. escuela politécnica del ejército*. ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO.
- Procobre. (2012). *SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA 0*. Recuperado de <https://www.analfatecnicos.net/archivos/08.PuestaATierra.pdf>
- Ramirez, J. S., & Cano, E. A. (2010). *Sistemas de Puesta a Tierra: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF*. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/4770/>
- Rdenberg, R. (2013). Grounding principles and practice I — Fundamental considerations on ground currents. *Electrical Engineering*, 64(1), 1–13. <https://doi.org/10.1109/ee.1945.6440813>
- Reyna, Á. (2007). *Corrosión De Electroodos De Puesta a Tierra*. Recuperado de www.dehn.de
- Rüdenberg, R. (2013). Grounding principles and practice I — Fundamental considerations on ground currents. *Electrical Engineering*, 64(1), 1–13. <https://doi.org/10.1109/ee.1945.6440813>
- Ruelas, R. (2009a). Formulario para obtener la resistencia a tierra, 1–12.
- Ruelas, R. (2009b). Teoría y diseño de sistemas de tierras. Recuperado el 19 de marzo de 2019, de <http://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe01.html>
- Sankosha, C. (2006). Practical Measures for Loweing Resistance To Grounding. Recuperado de <http://www.sankosha-usa.com/pdf/san-earth-tech.pdf>
- Schneider, E. (2000). CT-173 Los esquemas de las conexiones a tierra en el mundo y su evolución, 32.
- Schwarz, s. J. (1954). Analytical Expressions for the Resistance of Grounding Systems. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, 73(2), 1011–1016. <https://doi.org/10.1109/AIEEPAS.1954.4498923>

- Short, T. A. (2014). Lightning Protection. En *Electric Power Distribution Handbook* (pp. 659–724). <https://doi.org/10.1201/b16747-13>
- Solís, J. S. C., Prado, E. P., & Cano, E. A. (2007). Estudio de la Interconectividad de un Sistema de Puesta a Tierra por medio del ATP, 1–6.
- Suárez, O. (2004). Metodología para el cálculo de sistemas de puesta a tierra en líneas de tensión intermedias. *Revista Científica de Ingeniería Energética*, 25(2).
- Tu, Y., He, J., & Zeng, R. (2006). Lightning impulse performances of grounding devices covered with low-resistivity materials. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21(3), 1706–1713. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.874110>
- UNE, E. (2012). Requisitos para los componentes de los sistemas de protección contra el rayo, 20.
- UPME. (2013). Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE). Bogotá, Colombia, 210. Recuperado de <http://www.minminas.gov.co/documents/10180/1179442/Anexo+General+del+RETIE+vigente+actualizado+a+2015-1.pdf/57874c58-e61e-4104-8b8c-b64dbabedb13>
- Wayne, H. (2000). *Handbook of Electric Power Calculations*. Recuperado de http://www.amazon.com/Handbook-Electric-Power-Calculations-Wayne/dp/0071362983/ref=sr_1_5?s=books&ie=UTF8&qid=1410480364&sr=1-5&keywords=electric+power+system+planning#reader_0071362983

8. ANEXOS

8.1. ANEXO A.

EXPERIMENTO DE VALIDACIÓN.



AUTORES

Oscar Mauricio Zambrano Sánchez 1095909993

DIRECTOR

Ing. MPE. Fabio Alfonso González

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA - GIE

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍAS
INGENIERÍA ELÉCTRICA
BUCARAMANGA

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
UBICACIÓN.....	2
RESISTIVIDAD DEL TERRENO.....	2
CÁLCULO DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	3
PRIMERA MALLA	3
REGISTRO FOTOGRÁFICO DE CONSTRUCCIÓN	4
SEGUNDA MALLA.....	6
REGISTRO FOTOGRÁFICO DE CONSTRUCCIÓN	7
TERCERA MALLA	9
REGISTRO FOTOGRÁFICO DE CONSTRUCCIÓN	9
MEDICIÓN DE LA RESISTENCIAS DE PUESTA A TIERRA.....	10
REGISTRO FOTOGRÁFICO MEDIDA DE RPT DE LA PRIMERA MALLA.....	12
REGISTRO FOTOGRÁFICO MEDIDA DE RPT DE LA SEGUNDA MALLA	13
REGISTRO FOTOGRÁFICO MEDIDA DE RPT DE LA TERCERA MALLA.....	14
OBSERVACIONES.....	16
REPORTES TOTAL GRID.....	17
CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN.....	30

LISTA DE TABLAS

Tabla A- 1. Resistividad aparente del terreno	3
Tabla A- 2. Resultados de cálculo de la primera malla.....	3
Tabla A- 3. Actividades de construcción de la primera malla.....	4
Tabla A- 4 Resultados de cálculo de la segunda malla.	6
Tabla A- 5. Actividades de construcción de la segunda malla.....	7
Tabla A- 6. Resultados de cálculo de la tercera malla.....	9
Tabla A- 7. Actividades de construcción de la tercera malla.....	9
Tabla A- 8. Medida de resistencia.....	11
Tabla A- 9. Resumen malla 1.....	15
Tabla A- 10. Resumen malla 2.....	15
Tabla A- 11. Resumen malla 3.....	15
Tabla A- 12. Porcentajes de reducción de RPT entre mallas.	15

LISTA DE FIGURAS

Figura A- 1. Ubicación área de construcción.....	2
Figura A- 2. Ruta medida de resistividad del terreno.....	2
Figura A- 3. Ruta de medida de RPT.	11
Figura A- 4. Serial del equipo de medida	11
Figura A- 5. Resistencia al 52% primera malla.....	12
Figura A- 6. Resistencia al 62% primera malla.....	12
Figura A- 7. Resistencia al 72% primera malla.....	12
Figura A- 8. Resistencia al 52% segunda malla.	13
Figura A- 9. Resistencia al 62% segunda malla.	13
Figura A- 10. Resistencia al 72% segunda malla.	13
Figura A- 11. Resistencia al 52% segunda malla.	14
Figura A- 12. Resistencia al 62% segunda malla.	14
Figura A- 13. Resistencia al 72% segunda malla.	14

INTRODUCCIÓN

En el presente documento se pretende exponer los resultados obtenidos del experimento comparativo entre las ecuaciones para electrodos horizontales y las ecuaciones presentadas en el estándar ANSI/IEEE-80 versión 2013, denotando con ello el efecto del aumento de la cantidad de electrodos enterrado en una malla en la resistencia de puesta a tierra y comparando los resultados con los análisis matemáticos.

El experimento consta en la construcción de 3 mallas de puesta a tierra en una misma ubicación; una primera malla con una cantidad de cable reducido, la segunda con mayor cantidad de conductor, la tercera aplicando un material mejorador de puesta a tierra y el cálculo de la resistencia de puesta a tierra de dichas rejillas mediante las ecuaciones mencionadas anteriormente.

UBICACIÓN.

La ubicación seleccionada para el experimento se encuentra en predios de la sede principal de las Unidades Tecnológicas de Santander en la ciudad de Bucaramanga – Colombia, con coordenadas 7°06'18" N 73°07'22" W a 931 metros sobre el nivel del mar, ver Figura A- 1.

Figura A- 1. Ubicación área de construcción.



RESISTIVIDAD DEL TERRENO.



Se realizan dos sondeos de resistividad mediante el método de Wenner, con un telurómetro marca Metrel MI2088 con separación entre los electrodos de 1 y 2 metros, como se muestra en la Figura A- 2. Los resultados de las medidas de resistividad se presentan en la Tabla A- 1.

Las medidas se realizaron el día 17 de junio del 2020, el terreno presenta un estado seco debido a no presentarse lluvias en varias semanas, esto permite eliminar la necesidad de corrección de las medidas tomadas por motivo de altos porcentajes de humedad en el terreno.

Figura A- 2. Ruta medida de resistividad del terreno.



Tabla A- 1. Resistividad aparente del terreno.

SEPARACIÓN ELECTRODOS (M)	RESISTENCIA (Ω)	REGISTRO FOTOGRÁFICO
1	104.6	
2	160.4	

CÁLCULO DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA.

Mediante el uso del software TOTAL GRID se realizan los cálculos de resistencia de puesta a tierra de las tres mallas del experimento. A continuación, se presentan los resultados calculados para dichos sistemas.

PRIMERA MALLA.

Para esta primera malla se estipula una malla de 5m x 2m con 3 conductores en paralelo a cada lado de la misma y una profundidad de enterramiento de 0.5 m, para una longitud total de 21 metros de conductor enterrado.

Tabla A- 2. Resultados de cálculo de la primera malla.

ECUACIÓN	RESISTENCIA (Ω)
Sverak	22.43
Schwarz	18.17

ECUACIÓN		RESISTENCIA (Ω)
Electrodo horizontal	Dwight	11.94
	NMX-J-549	11.89
	Sankosha	12.56
	Copper-development	12.56

REGISTRO FOTOGRÁFICO DE CONSTRUCCIÓN.

Tabla A- 3. Actividades de construcción de la primera malla.

ITEM	ACTIVIDAD	REGISTRO
1	EXCAVACIÓN	

ÍTEM	ACTIVIDAD	REGISTRO
2	CONSTRUCCIÓN	
3	MALLA FINAL	

ÍTEM	ACTIVIDAD	REGISTRO
4	RELLENO	
5	COMPACTACIÓN	

SEGUNDA MALLA.

Para la segunda malla se considera una malla de 5m x 2m con 5 conductores en paralelo a cada lado de la misma y una profundidad de enterramiento de 0.5 m, para una longitud total de 35 metros de conductor enterrado.

Tabla A- 4 Resultados de cálculo de la segunda malla.

ECUACIÓN		RESISTENCIA (Ω)
Sverak		20.12
Schwarz		17.58
Electrodo horizontal	Dwight	7.83
	NMX-J-549	7.81
	Sankosha	8.21

ECUACIÓN		RESISTENCIA (Ω)
	Copper- development	8.21

REGISTRO FOTOGRÁFICO DE CONSTRUCCIÓN.

Tabla A- 5. Actividades de construcción de la segunda malla.

ITEM	ACTIVIDAD	REGISTRO
1	EXCAVACIÓN	
2	CONSTRUCCIÓN	

ÍTEM	ACTIVIDAD	REGISTRO
3	MALLA FINAL	
4	RELLENO	
5	COMPACTACIÓN	

TERCERA MALLA.

Para la tercera malla se considera una malla de 5m x 2m con 5 conductores en paralelo a cada lado de la misma y una profundidad de enterramiento de 0.5 m, para una longitud total de 35 metros de conductor enterrado con recubrimiento de cemento conductivo teniendo dimensiones de 0.15m x 0.05m.




Tabla A- 6. Resultados de cálculo de la tercera malla.

ECUACIÓN		RESISTENCIA (Ω)
Electrodo con mejorador	Hallmark	6.84528

REGISTRO FOTOGRÁFICO DE CONSTRUCCIÓN.

Tabla A- 7. Actividades de construcción de la tercera malla.

ÍTEM	ACTIVIDAD	REGISTRO
1	EXCAVACIÓN	
2	PREPARACIÓN DE MATERIAL MEJORADOR DE PUESTA A TIERRA	

ÍTEM	ACTIVIDAD	REGISTRO
3	CONSTRUCCIÓN	
4	MALLA FINAL	
5	RELLENO	

MEDICIÓN DE LA RESISTENCIAS DE PUESTA A TIERRA.

En la Tabla A- 8 se presentan los resultados obtenidos de las medidas de resistencia de puesta a tierra de las tres (3) mallas realizadas anteriormente. la metodología a ser usada es el 62%, ubicando el electrodo auxiliar de corriente a treinta (30) metros desde el punto más externo de la malla, siendo ubicado el electrodo auxiliar de voltaje a dieciocho (18) metros de la malla, adicionalmente se realizan medidas del 52% y 72% como método de verificación de las medidas de resistencia. En la Figura A- 3 se muestra la Ruta de medida seleccionada para las tres (3) mallas; adicional, en la Figura A- 4 se muestra el serial del equipo a ser utilizado.

Figura A- 3. Ruta de medida de RPT.



Figura A- 4. Serial del equipo de medida.



Tabla A- 8. Medida de resistencia.

MALLA	RESISTENCIA MEDIDA (Ω)		
	52%	62%	72%
1	19.64	20.8	22
2	17.6	18.73	19.91

MALLA	RESISTENCIA MEDIDA (Ω)		
	52%	62%	72%
3	7.40	8.56	9.56

REGISTRO FOTOGRÁFICO MEDIDA DE RPT DE LA PRIMERA MALLA.

Figura A- 5. Resistencia al 52% primera malla.



Figura A- 6. Resistencia al 62% primera malla.



Figura A- 7. Resistencia al 72% primera malla.



REGISTRO FOTOGRÁFICO MEDIDA DE RPT DE LA SEGUNDA MALLA.

Figura A- 8. Resistencia al 52% segunda malla.



Figura A- 9. Resistencia al 62% segunda malla.



Figura A- 10. Resistencia al 72% segunda malla.



REGISTRO FOTOGRÁFICO MEDIDA DE RPT DE LA TERCERA MALLA.

Figura A- 11. Resistencia al 52% segunda malla.



Figura A- 12. Resistencia al 62% segunda malla.



Figura A- 13. Resistencia al 72% segunda malla.



Tabla A- 9. Resumen malla 1.

ECUACIÓN		RESISTENCIA CALCULADA (Ω)	RESISTENCIA MEDIDA (Ω)	ERROR DE PROCESO
Sverak		22.43	20.8	7.27%
Schwarz		18.17		12.64%
Electrodo horizontal	Dwight	11.94		42.60%
	NMX-J-549	11.89		42.84%
	Sankosha	12.56		39.62%
	Copper-development	12.56		39.62%

Tabla A- 10. Resumen malla 2.

ECUACIÓN		RESISTENCIA CALCULADA (Ω)	RESISTENCIA MEDIDA (Ω)	ERROR DE PROCESO
Sverak		20.12	18.73	6.91%
Schwarz		17.58		6.14%
Electrodo horizontal	Dwight	7.83		58.20%
	NMX-J-549	7.81		58.30%
	Sankosha	8.21		56.17%
	Copper-development	8.21		56.17%

Tabla A- 11. Resumen malla 3.

ECUACIÓN		RESISTENCIA CALCULADA (Ω)	RESISTENCIA MEDIDA (Ω)	ERROR DE PROCESO
Electrodo con mejorador	Hallmark	6.84528	8.56	20.03%

Tabla A- 12. Porcentajes de reducción de RPT entre mallas.

MALLA	1	2	3
Resistencia medida	20.8	18.73	8.56
Porcentaje reducción de RPT de la malla 2 con respecto a la malla 1	9.95%		
Porcentaje reducción de RPT de la malla 3 con respecto a la malla 2	54.30%		

OBSERVACIONES.

Los resultados presentados en el anterior experimento contienen margen de error debido a temas climatológicos al momento de realizar las medidas de resistencia o en días previos.

La construcción de las mallas se ejecuta con diferencia aproximada de seis (6) meses por motivos de sanidad pública en tiempo de pandemia.

REPORTES TOTAL GRID
REPORTE GENERAL
DE PUESTAS A TIERRA

MALLA #1 - ELECTRODO HORIZONTAL



Fecha de reporte: 08-Aug-2020 14:21:54

Datos de resistividad del terreno

Separación [m]	Res. [ohm m]	Res. [ohm m]	Res. prom.[ohm m]
	RUTA 1	RUTA 2	
1	104.6	104.6	104.6
2	160.4	160.4	160.4
RESISTIVIDAD (CON PROBABILIDAD DEL 70% DE NO SER SUPERADA)			144.894 [ohm-m]

Datos del conductor.

Tipo de diseño	Electrodo horizontal
Tratamiento	No aplica
Método de cálculo	COPPER DEVELOPMENT
Radio del conductor [m]	0
Longitud del conductor [m]	21
Profundidad de enterramiento [m]	0.5
Valor pico de la corriente del rayo [kA]	43
Longitud efectiva [m]	22.1
Resistencia [ohm]	12.56

REPORTE GENERAL DE PUESTAS A TIERRA

MALLA #1 - ELECTRODO HORIZONTAL



Fecha de reporte: 08-Aug-2020 14:21:00

Datos de resistividad del terreno

Separación [m]	Res. [ohm m]	Res. [ohm m]	Res. prom.[ohm m]
	RUTA 1	RUTA 2	
1	104.6	104.6	104.6
2	160.4	160.4	160.4
RESISTIVIDAD (CON PROBABILIDAD DEL 70% DE NO SER SUPERADA)			144.894 [ohm-m]

Datos del conductor.

Tipo de diseño	Electrodo horizontal
Tratamiento	No aplica
Método de cálculo	DWIGHT
Radio del conductor [m]	0
Longitud del conductor [m]	21
Profundidad de enterramiento [m]	0.5
Valor pico de la corriente del rayo [kA]	43
Longitud efectiva [m]	22.1
Resistencia [ohm]	11.94

REPORTE GENERAL DE PUESTAS A TIERRA

MALLA #1 - ELECTRODO HORIZONTAL



Fecha de reporte: 08-Aug-2020 14:21:17

Datos de resistividad del terreno

Separación [m]	Res. [ohm m]	Res. [ohm m]	Res. prom.[ohm m]
	RUTA 1	RUTA 2	
1	104.6	104.6	104.6
2	160.4	160.4	160.4
RESISTIVIDAD (CON PROBABILIDAD DEL 70% DE NO SER SUPERADA)			144.894 [ohm-m]

Datos del conductor.

Tipo de diseño	Electrodo horizontal
Tratamiento	No aplica
Método de cálculo	NMX-J-549
Radio del conductor [m]	0
Longitud del conductor [m]	21
Profundidad de enterramiento [m]	0.5
Valor pico de la corriente del rayo [kA]	43
Longitud efectiva [m]	22.1
Resistencia [ohm]	11.89

REPORTE GENERAL DE PUESTAS A TIERRA

MALLA #1 - ELECTRODO HORIZONTAL



Fecha de reporte: 08-Aug-2020 14:21:35

Datos de resistividad del terreno

Separación [m]	Res. [ohm m]	Res. [ohm m]	Res. prom.[ohm m]
	RUTA 1	RUTA 2	
1	104.6	104.6	104.6
2	160.4	160.4	160.4
RESISTIVIDAD (CON PROBABILIDAD DEL 70% DE NO SER SUPERADA)			144.894 [ohm-m]

Datos del conductor.

Tipo de diseño	Electrodo horizontal
Tratamiento	No aplica
Método de cálculo	SANKOSHA
Radio del conductor [m]	0
Longitud del conductor [m]	21
Profundidad de enterramiento [m]	0.5
Valor pico de la corriente del rayo [kA]	43
Longitud efectiva [m]	22.1
Resistencia [ohm]	12.56

REPORTE GENERAL DE PUESTAS A TIERRA

MALLA #1 - SCHWARZ



Fecha de reporte: 09-Aug-2020 21:21:33

Datos de resistividad del terreno

Separación [m]	Res. [ohm m]	Res. [ohm m]	Res. prom.[ohm m]
	RUTA 1	RUTA 2	
1	104.6	104.6	104.6
2	160.4	160.4	160.4
RESISTIVIDAD (CON PROBABILIDAD DEL 70% DE NO SER SUPERADA)			144.894 [ohm-m]

Datos del conductor.

Tipo de diseño	MALLAS
Tratamiento	No aplica
Método	Schwarz
X	5
Y	2
Z	0.5
Nx	3
Ny	3
Longitud de cable (m)	21
Diámetro de cable (m)	0.0095
Número de varillas	1
Longitud de varillas (m)	2.44
Diámetro de varillas (m)	0.02
Resistencia [ohm]	18.17

REPORTE GENERAL DE PUESTAS A TIERRA

MALLA #1 - SVERAK



Fecha de reporte: 09-Aug-2020 21:19:23

Datos de resistividad del terreno

Separación [m]	Res. [ohm m]	Res. [ohm m]	Res. prom.[ohm m]
	RUTA 1	RUTA 2	
1	104.6	104.6	104.6
2	160.4	160.4	160.4
RESISTIVIDAD (CON PROBABILIDAD DEL 70% DE NO SER SUPERADA)			144.894 [ohm-m]

Datos del conductor.

Tipo de diseño	MALLAS
Tratamiento	No aplica
Método	Sverak
X	5
Y	2
Z	0.5
Nx	3
Ny	3
Longitud de cable (m)	21
Diámetro de cable (m)	0
Número de varillas	1
Longitud de varillas (m)	2.44
Diámetro de varillas (m)	0.02
Resistencia [ohm]	22.43

REPORTE GENERAL DE PUESTAS A TIERRA

MALLA #2 - ELECTRODO HORIZONTAL



Fecha de reporte: 08-Aug-2020 14:25:12

Datos de resistividad del terreno

Separación [m]	Res. [ohm m]	Res. [ohm m]	Res. prom.[ohm m]
	RUTA 1	RUTA 2	
1	104.6	104.6	104.6
2	160.4	160.4	160.4
RESISTIVIDAD (CON PROBABILIDAD DEL 70% DE NO SER SUPERADA)			144.894 [ohm-m]

Datos del conductor.

Tipo de diseño	Electrodo horizontal
Tratamiento	No aplica
Método de cálculo	COPPER DEVELOPMENT
Radio del conductor [m]	0
Longitud del conductor [m]	35
Profundidad de enterramiento [m]	0.5
Valor pico de la corriente del rayo [kA]	43
Longitud efectiva [m]	22.1
Resistencia [ohm]	8.21

REPORTE GENERAL DE PUESTAS A TIERRA

MALLA #2 - ELECTRODO HORIZONTAL



Fecha de reporte: 08-Aug-2020 14:24:18

Datos de resistividad del terreno

Separación [m]	Res. [ohm m]	Res. [ohm m]	Res. prom.[ohm m]
	RUTA 1	RUTA 2	
1	104.6	104.6	104.6
2	160.4	160.4	160.4
RESISTIVIDAD (CON PROBABILIDAD DEL 70% DE NO SER SUPERADA)			144.894 [ohm-m]

Datos del conductor.

Tipo de diseño	Electrodo horizontal
Tratamiento	No aplica
Método de cálculo	DWIGHT
Radio del conductor [m]	0
Longitud del conductor [m]	35
Profundidad de enterramiento [m]	0.5
Valor pico de la corriente del rayo [kA]	43
Longitud efectiva [m]	22.1
Resistencia [ohm]	7.83

REPORTE GENERAL DE PUESTAS A TIERRA

MALLA #2 - ELECTRODO HORIZONTAL



Fecha de reporte: 08-Aug-2020 14:24:38

Datos de resistividad del terreno

Separación [m]	Res. [ohm m]	Res. [ohm m]	Res. prom.[ohm m]
	RUTA 1	RUTA 2	
1	104.6	104.6	104.6
2	160.4	160.4	160.4
RESISTIVIDAD (CON PROBABILIDAD DEL 70% DE NO SER SUPERADA)			144.894 [ohm-m]

Datos del conductor.

Tipo de diseño	Electrodo horizontal
Tratamiento	No aplica
Método de cálculo	NMX-J-549
Radio del conductor [m]	0
Longitud del conductor [m]	35
Profundidad de enterramiento [m]	0.5
Valor pico de la corriente del rayo [kA]	43
Longitud efectiva [m]	22.1
Resistencia [ohm]	7.81

REPORTE GENERAL DE PUESTAS A TIERRA

MALLA #2 - ELECTRODO HORIZONTAL



Fecha de reporte: 08-Aug-2020 14:24:56

Datos de resistividad del terreno

Separación [m]	Res. [ohm m]	Res. [ohm m]	Res. prom.[ohm m]
	RUTA 1	RUTA 2	
1	104.6	104.6	104.6
2	160.4	160.4	160.4
RESISTIVIDAD (CON PROBABILIDAD DEL 70% DE NO SER SUPERADA)			144.894 [ohm-m]

Datos del conductor.

Tipo de diseño	Electrodo horizontal
Tratamiento	No aplica
Método de cálculo	SANKOSHA
Radio del conductor [m]	0
Longitud del conductor [m]	35
Profundidad de enterramiento [m]	0.5
Valor pico de la corriente del rayo [kA]	43
Longitud efectiva [m]	22.1
Resistencia [ohm]	8.21

REPORTE GENERAL DE PUESTAS A TIERRA

MALLA #2 - SCHWARZ



Fecha de reporte: 09-Aug-2020 21:22:53

Datos de resistividad del terreno

Separación [m]	Res. [ohm m]	Res. [ohm m]	Res. prom.[ohm m]
	RUTA 1	RUTA 2	
1	104.6	104.6	104.6
2	160.4	160.4	160.4
RESISTIVIDAD (CON PROBABILIDAD DEL 70% DE NO SER SUPERADA)			144.894 [ohm-m]

Datos del conductor.

Tipo de diseño	MALLAS
Tratamiento	No aplica
Método	Schwarz
X	5
Y	2
Z	0.5
Nx	5
Ny	5
Longitud de cable (m)	35
Diámetro de cable (m)	0.0095
Número de varillas	1
Longitud de varillas (m)	2.44
Diámetro de varillas (m)	0.02
Resistencia [ohm]	17.58

REPORTE GENERAL DE PUESTAS A TIERRA

MALLA #2 - SVERAK



Fecha de reporte: 09-Aug-2020 21:25:26

Datos de resistividad del terreno

Separación [m]	Res. [ohm m]	Res. [ohm m]	Res. prom.[ohm m]
	RUTA 1	RUTA 2	
1	104.6	104.6	104.6
2	160.4	160.4	160.4
RESISTIVIDAD (CON PROBABILIDAD DEL 70% DE NO SER SUPERADA)			144.894 [ohm-m]

Datos del conductor.

Tipo de diseño	MALLAS
Tratamiento	No aplica
Método	Sverak
X	5
Y	2
Z	0.5
Nx	5
Ny	5
Longitud de cable (m)	35
Diámetro de cable (m)	0
Número de varillas	1
Longitud de varillas (m)	2.44
Diámetro de varillas (m)	0.02
Resistencia [ohm]	20.12

REPORTE GENERAL DE PUESTAS A TIERRA

MALLA #3 - ELECTRODO CON MEJORADOR



Fecha de reporte: 08-Aug-2020 13:07:18

Datos de resistividad del terreno

Separación [m]	Res. [ohm m]	Res. [ohm m]	Res. prom.[ohm m]
	RUTA 1	RUTA 2	
1	104.6	104.6	104.6
2	160.4	160.4	160.4
RESISTIVIDAD (CON PROBABILIDAD DEL 70% DE NO SER SUPERADA)			144.894 [ohm-m]

Datos del conductor.

Tipo de diseño	Contrapesos
Tratamiento	Si aplica
Método de cálculo	HALLMARK
Ancho del conductor [m]	0.05
Longitud del conductor [m]	35
Profundidad de enterramiento [m]	0.5
Valor pico de la corriente del rayo [kA]	43
Longitud efectiva [m]	22.1
Resistencia [ohm]	7.57

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN



ISO/IEC 17025: 2005
18-LAC-017

CERTIFICADO DE CALIBRACION

Página 1 de 5

No. 3374

2020/06/26

Cliente: CELEC DE COLOMBIA S.A.S.
Carrera 18 No 36 – 50 Oficina 11 03 Edificio Cincuentenario,
Bucaramanga; Teléfono: 317 383 69 47,
NIT: 901.304.717.

Instrumento calibrado: Telurómetro.
Fabricante: METREL
Modelo: MI 2088.
Número de Serie: 10450263.

Fecha de Calibración: Junio 25 del 2020.

1. METODO DE CALIBRACIÓN.

El método de calibración empleado es de comparación de las mediciones del instrumento a calibrar con el patrón, de acuerdo con los procedimientos:

- EURAMET, cg – 15, "Guidelines on the calibration of digital multimeters", Version 3.0 (02/2015).
- CEM, EL – 004, "Procedimiento para la calibración de megóhmetros". Versión digital 1.
- SIT/Tec-014/06 Servizio di Taratura di Italia Revisión 0.
- LC-MT-007 método para la calibración de telurómetros Versión 3 del 2019-01-28.

2. EQUIPOS UTILIZADOS EN LA CALIBRACIÓN.

EQUIPO	NÚMERO DE SERIE	CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN	FECHA DE CALIBRACIÓN	EMITE
Calibrador Omicron CMC 256 PLUS	LD072F	D2012020	2020-01-22	a&d Messtechnik
Termohigrómetro Testo 175-H1	4032 6218	CLH 136819 CLT 565119	2019-11-12 2019-11-14	Conamet
Cronómetro Control Company 1052MX	1705624220	CMK-TFA-1961	2019-09-10	Colmetrik
Década de resistencia CS-2077	17120010	E-19-1999	2019-12-18	Metrel d.d.
Década de Resistencia CS-3000	19510092	E-19-1988	2019-12-17	Metrel d.d.

Tabla 1. Equipos utilizados en la calibración.

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO SIN PREVIA AUTORIZACIÓN.

Código: LC-FR-001/Versión: 8/ Emisión 2020-06-21/

ERASMUS S.A.S.

Dirección: Diagonal 40A No. 18-09, Bogotá, Laboratorio de calibración.

Teléfono: (57) (1) 4864030 Ext. 1112

Correo electrónico: laboratorio@erasmus.com.co – Página Web: www.erasmus.com.co

3. TRAZABILIDAD METROLÓGICA.

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a patrones nacionales o internacionales, los cuales realizan las unidades de medida de acuerdo al sistema internacional de unidades S.I.

4. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN.

La incertidumbre expandida de la medición reportada se establece como la incertidumbre estándar de medición multiplicada por el factor de cobertura k y la probabilidad de cobertura, la cual debe ser aproximada al 95% y no menor a este valor.

Medición de resistencia de aislamiento - Rango 100 V						
Rango	Unidad	Valor de referencia	Valor leído	Error de la lectura	Incertidumbre expandida	k
MΩ	----	----	----	----	----	----
0,000 a 1,999	MΩ	0,099	0,098	-0,001	0,013	1,97

Tabla 2. Calibración de la función de medición de resistencia de aislamiento con tensión eléctrica de 100 V.

Medición de resistencia de aislamiento - Rango 200 V						
Rango	Unidad	Valor de referencia	Valor leído	Error de la lectura	Incertidumbre expandida	k
MΩ	----	----	----	----	----	----
0,000 a 1,999	MΩ	0,099	0,099	-0,000	0,015	1,97

Tabla 3. Calibración de la función de medición de resistencia de aislamiento con tensión eléctrica de 200 V.

Medición de resistencia de aislamiento - Rango 1000 V						
Rango	Unidad	Valor de referencia	Valor leído	Error de la lectura	Incertidumbre expandida	k
MΩ	----	----	----	----	----	----
0,000 a 1,999	MΩ	0,998	1,003	0,005	0,013	1,97
	MΩ	2,00	2,01	0,013	0,015	1,96
2,00 a 19,99	MΩ	4,99	5,01	0,021	0,026	1,97
	MΩ	9,99	10,04	0,048	0,026	1,97
	MΩ	20,0	20,0	0,01	0,14	1,96
20,0 a 199,9	MΩ	50,0	49,9	-0,07	0,19	1,97
	MΩ	100,2	99,1	-1,1	1,8	1,97
	MΩ	200,1	199,5	-0,6	1,6	1,97
200 a 1999	MΩ	500	489	-10,8	1,9	1,97
	MΩ	1001	951	-50	20	1,97
	GΩ	2,00	1,80	-0,204	0,019	1,97
2,00 a 19,99	GΩ	5,03	3,86	-1,171	0,022	1,97
	GΩ	10,02	8,70	-1,32	0,20	1,97
	GΩ	20,06	12,48	-7,58	0,22	1,97

Tabla 4. Calibración de la función de medición de resistencia de aislamiento con tensión eléctrica de 1000 V.

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO SIN PREVIA AUTORIZACIÓN.

Código: LC-FR-001/Versión: 8/ Emisión 2020-06-21/

CERTIFICADO DE CALIBRACION

Página 3 de 5

No. 3374

2020/06/26

Medición de Resistencia de Tierra - 4 - Hilos-125Hz						
Rango	Unidad	Valor de referencia	Valor leído	Error de la lectura	Incertidumbre expandida	k
Ω	-----	-----	-----	-----	-----	-----
0,00 A 19,99	Ω	0,50	0,51	0,008	0,014	1,96
	Ω	1,00	1,00	0,000	0,015	1,96
	Ω	19,02	19,03	0,011	0,014	1,99
Ω	-----	-----	-----	-----	-----	-----
20,0 A 199,9	Ω	100,0	100,1	0,09	0,11	1,96
	Ω	190,2	190,3	0,07	0,12	1,98
Ω	-----	-----	-----	-----	-----	-----
200 A 999	Ω	1000	1002	1,6	1,1	1,96
$k\Omega$	-----	-----	-----	-----	-----	-----
1,000 A 1,999	$k\Omega$	1,902	1,906	0,0041	0,0011	1,96
$k\Omega$	-----	-----	-----	-----	-----	-----
2,00 A 19,99	$k\Omega$	10,01	10,06	0,055	0,020	1,96
	$k\Omega$	19,00	19,14	0,143	0,015	1,96

Tabla 5. Calibración de la función de medición de resistencia de tierra a 4 Hilos a una frecuencia 125 Hz.

Medición de resistencia						
Rango	Unidad	Valor de referencia	Valor leído	Error de la lectura	Incertidumbre expandida	k
Ω	-----	-----	-----	-----	-----	-----
0,00 A 19,99	Ω	0,50	0,50	0,002	0,015	2,07
	Ω	1,00	1,00	0,000	0,020	1,97
	Ω	19,02	19,16	0,133	0,017	2,07
Ω	-----	-----	-----	-----	-----	-----
20,0 A 199,9	Ω	29,0	29,3	0,252	0,057	1,97
	Ω	190,2	190,2	0,010	0,057	1,97
Ω	-----	-----	-----	-----	-----	-----
200 A 1999	Ω	290	290	-0,20	0,57	1,97
	Ω	1902	1897	-4,50	0,58	1,97

Tabla 6. Calibración de la función de medición de resistencia.

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO SIN PREVIA AUTORIZACIÓN.

Código: LC-FR-001/Versión: R/ Emisión 2020-06-21/

ERASMUS S.A.S.

Dirección: Diagonal 40A No. 18-09, Bogotá, Laboratorio de calibración.

Teléfono: (57) (1) 4864030 Ext. 1112

Correo electrónico: laboratorio@erasmus.com.co - Página Web: www.erasmus.com.co

Medición de tensión eléctrica C.C.						
Rango	Unidad	Valor de referencia	Valor leído	Error de la lectura	Incertidumbre expandida	k
V	---	---	---	---	---	---
0 A 600	V	60	61	1,00	0,57	1,97
	V	300	305	4,99	0,57	1,97
	V	540	548	7,99	0,57	1,97

Tabla 7. Calibración de la función de medición de tensión eléctrica C.C.

Medición de tensión eléctrica C.A.							
Rango	Unidad	Frecuencia	Valor de referencia	Valor leído	Error de la lectura	Incertidumbre expandida	k
V	---	KHz	---	---	---	---	---
0 A 600	V	0,06	60	61	1,00	0,57	1,97
	V	0,06	300	304	3,97	0,57	1,97
	V	0,06	540	547	6,94	0,57	1,97

Tabla 8. Calibración de la función de medición de tensión eléctrica C.A.

Medición de corriente eléctrica C.A. (50 Hz)						
Rango	Unidad	Valor de referencia	Valor leído	Error de la lectura	Incertidumbre expandida	k
A	---	---	---	---	---	---
1,00 A 9,99	A	3,25	3,26	0,01	0,12	1,96
	A	5,50	5,49	-0,01	0,12	1,96
	A	7,75	7,72	-0,03	0,12	1,96
	A	9,10	9,05	-0,05	0,12	1,97
10,0 A 99,9	A	14,18	14,06	-0,11	0,12	1,97
	A	18,35	18,19	-0,16	0,12	1,97
	A	22,5	22,7	0,17	0,12	1,97
	A	25,0	25,2	0,20	0,12	1,97

Tabla 9. Calibración de la función de medición de corriente eléctrica C.A.

5. PRUEBAS REALIZADAS PREVIAS A LA CALIBRACIÓN.

- *Inspección visual*
- *Desmagnetización de la pinza*
- *Repetibilidad*
- *Posicionamiento de la pinza*
- *Efecto de la carga sobre el generador*

6. OBSERVACIONES.

- Se realiza calibración con conexión a una fuente de tensión eléctrica C.C. externa.
- La incertidumbre de medición reportada fue estimada teniendo en cuenta las contribuciones debidas a la trazabilidad, especificaciones del instrumento patrón, resolución del instrumento bajo prueba, repetibilidad, posicionamiento de la pinza, y efecto de carga sobre el generador.

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO SIN PREVIA AUTORIZACIÓN.

Código: LC-FR-001/Versión: 8/ Emisión: 2020-06-21/

CERTIFICADO DE CALIBRACION
No. 3374
2020/06/26

Página 5 de 5

7. INFORMACIÓN ADICIONAL DE LA CALIBRACIÓN.

Encargado(s) de la calibración:		Edwin Raúl Quiñonez Capera (sesión 1) - Rafael Zamudio Ayala (sesión 2)		
Supervisor:		Ronald Sánchez Pinzón.		
Personal adicional:		Ninguno.		
Código de muestra:		4528.		
Fecha de recepción		2020-06-10.		
Sesión 1				
Condiciones ambientales	Temperatura (°C)	24,9 ± 0,2	Humedad relativa (%)	49,8 ± 1,6
Intervalo de tiempo de la prueba	Hora Inicial	15:01	Hora Final	15:16
Sesión 2				
Condiciones ambientales	Temperatura (°C)	24,9 ± 0,2	Humedad relativa (%)	49,7 ± 1,6
Intervalo de tiempo de la prueba	Hora Inicial	15:23	Hora Final	15:58

Tabla 10. Información adicional de la calibración

8. RESPONSABLES.

Elaboro


Rafael Zamudio Ayala.
Metrólogo del laboratorio.

Aprobado


Ronald A. Sánchez Pinzón.
Director del laboratorio.

- Los resultados de calibración, medidas y declaración de conformidad solo se refieren al instrumento bajo prueba.
- Este certificado de calibración expresa fielmente el resultado de las mediciones realizadas y no podrán ser adulteradas ni manipuladas por personas ajenas a ERASMUS S.A.S.
- Los resultados contenidos en el presente certificado se refieren al momento y condiciones en el que se realizaron las mediciones.
- ERASMUS S.A.S. no se responsabiliza por la mala manipulación de los instrumentos calibrados o por los resultados que se obtengan por alguna persona o entidad a partir del uso del contenido de este certificado de calibración.
- ERASMUS S.A.S. no realiza ningún tipo de muestreo en las calibraciones realizadas.

Final del certificado.

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO SIN PREVIA AUTORIZACIÓN.

Código: LC-FR-001/versión: 8/ Emisión 2020-06-26/

ERASMUS S.A.S.

Dirección: Diagonal 40A No. 18-39, Bogotá, Laboratorio de calibración.

Teléfono: (57) (1) 4864030 Ext. 1112

Correo electrónico: laboratorio@erasmus.com.co – Página Web: www.erasmus.com.co

8.2. ANEXO B.

MANUAL DE USUARIO TOTAL GRID



OSCAR MAURICIO ZAMBRANO
SANCHEZ
UNIDADES TECNOLÓGICAS DE
SANTANDER
18-9-2020

**MANUAL DE
USUARIO
TOTAL GRID**

Contenido

1	DESCRIPCIÓN.....	1
2	PROGRAMACIÓN.....	3
3	INSTALACIÓN.....	4
3.1	COMPILACIÓN	4
4	COMPONENTES VISUALES	7
4.1	PANEL IEEE.....	7
4.2	PANEL ELECTRODOS VERTICALES	10
4.3	PANEL ELECTRODOS HORIZONTALES.....	11
4.4	PANEL PLACAS.....	14
4.5	PANEL MALLAS.....	15
4.6	PANEL MEJORAR SPT EXISTENTE	15
5	FUNCIONAMIENTO	17
5.1	PANTALLA DE INICIO	17
5.2	IEEE	19
5.2.1	PRIMER PANEL.....	19
5.2.2	SEGUNDO PANEL.....	19
5.2.3	TERCER PANEL	20
5.2.4	CUARTO PANEL.....	21
5.3	ELECTRODOS VERTICALES	22
5.3.1	ELECTRODO VERTICAL SIN MEJORADOR.....	22
5.3.2	ELECTRODO VERTICAL CON MEJORADOR.....	23
5.4	ELECTRODOS HORIZONTALES	23
5.4.1	ELECTRODO HORIZONTAL SIN MEJORADOR	23
5.4.2	ELECTRODO HORIZONTAL CON MEJORADOR	24
5.5	PLACAS	24
5.6	MALLAS	24
5.7	MEJORAR SPT EXISTENTE.....	25

TABLAS DE FIGURAS

Figura B- 1. Esquema de funcionamiento del TOTAL GRID.....	2
Figura B- 2. Application compiler. MATLAB	4
Figura B- 3. Icon displayed for the Application and the Application instaler	4
Figura B- 4. Select custom splash screen.	5
Figura B- 5. Pantalla de inicio.	7
Figura B- 6. IEEE primer panel	8
Figura B- 7. IEEE segundo panel.....	8
Figura B- 8. IEEE subpanel resistividad.	9
Figura B- 9. IEEE tercer panel	9
Figura B- 10. IEEE subpanel dimensiones malla.....	9
Figura B- 11. IEEE cuarto panel.....	10
Figura B- 12. VARILLAS primer panel.....	10
Figura B- 13. VARILLAS segundo panel	11
Figura B- 14. VARILLAS tercer panel.....	11
Figura B- 15. ELECTRODO HORIZONTAL primer panel.....	12
Figura B- 16. ELECTRODO HORIZONTAL segundo panel	12
Figura B- 17. ELECTRODO HORIZONTAL tercer panel.....	13
Figura B- 18. ELECTRODO HORIZONTAL cuarto panel	13
Figura B- 19. ELECTRODO HORIZONTAL quinto panel	13
Figura B- 20. ELECTRODO HORIZONTAL sexto panel	14
Figura B- 21. ELECTRODO HORIZONTAL séptimo panel.....	14
Figura B- 22. PLACAS primer panel	14
Figura B- 23. PLACAS segundo panel	15
Figura B- 24. MALLAS primer panel	15
Figura B- 25. MEJORAR EXISTENTE primer panel.....	16
Figura B- 26. Ventana selección pantalla inicio.	17
Figura B- 27. Ayudas de usuario.....	17
Figura B- 28. Información ayuda al usuario.....	18
Figura B- 29. Cálculo resistividad método BOX-COX.....	19
Figura B- 30. Dimensiones de la rejilla.	20
Figura B- 31. Dimensiones de varillas.....	21
Figura B- 32. Señal de error en resistividad	22
Figura B- 33. Señal error ingreso de datos.....	22
Figura B- 34. Alerta ingreso de electrodo vertical.....	25
Figura B- 35. MEJORAR SPT EXISTENTE panel electrodo horizontal	26
Figura B- 36. MEJORAR SPT EXISTENTE panel electrodo vertical	26

1 DESCRIPCIÓN.

Total grid es una herramienta computacional para el cálculo de resistencia de puesta a tierra, mediante una variedad de ecuaciones que se correlacionan con el tipo de electrodo a ser implementado y sus diferentes configuraciones; adicionalmente, se pueden realizar computaciones mediante el algoritmo del estándar ANSI/IEEE-80 en su versión 2013.

El usuario al trabajar con el TOTAL GRID obtendrá una poderosa herramienta que calcula la resistencia de electrodos horizontales, electrodos verticales, combinaciones entre estas dos configuraciones, electrodos tipo placa, el cálculo de un sistema de puesta a tierra en paralelo a uno existente para mejorar el valor de resistencia, por último, el cálculo de resistencia, tensiones de paso y contacto para subestaciones eléctricas.

Uno de los puntos de innovación del software, es la implementación del cálculo de resistencia de puesta a tierra dentro del estándar IEEE/ANSI-80 versión 2013, cuando se implementa un material mejorador de puesta a tierra cuya resistividad sea constante en el tiempo, adicionalmente de los métodos de Sverak y Schwarz estipulados en el estándar.

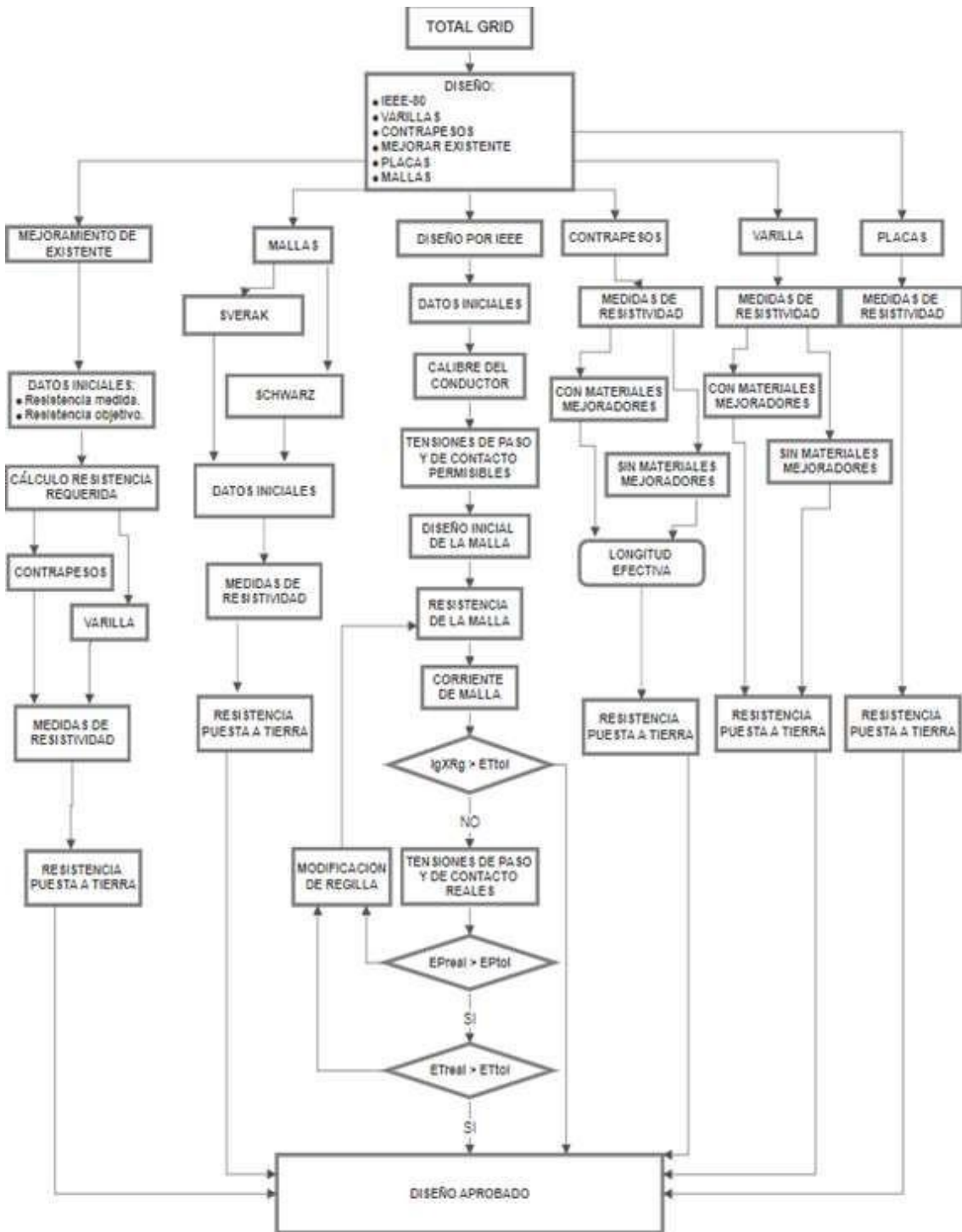
Los cálculos para electrodos verticales “varillas” se compone de dos topologías, electrodos sin material mejorador y electrodos con material mejorador de puesta a tierra. En las topologías mencionadas anteriormente se utilizan las ecuaciones de H.B. Dwight, R. Rüdénberg y Sankosha. También se incluye en las topologías el cálculo del paralelismo de varios electrodos verticales.

El cálculo de la resistencia de puesta a tierra (RPT) mediante el uso de conductor horizontal “cable”, también se tienen dos topologías como con los electrodos verticales. Con los electrodos sin tratamientos se tienen diversas configuraciones como lo son el cable forma de L, tipo estrella con 3, 4, 6, hasta 8 brazos, siendo calculados mediante las ecuaciones propuestas por H.B. Dwight, Sankosha y en la norma NMX-J-549-ance-2005. En cuanto a las configuraciones de cables con materiales mejoradores se utilizan las ecuaciones descritas por C.L Hallmark y por Sankosha. El TOTAL GRID incorpora el cálculo de la longitud efectiva de electrodos horizontales teniendo en cuenta variables importantes como lo es la corriente pico típica de un rayo.

El TOTAL GRID cuenta con funciones de cálculo de rejillas de puesta a tierra mediante las ecuaciones de Sverak y Schwarz sin la necesidad de ingresar al panel metodología IEEE-80, el cálculo de resistencia de electrodos tipo placa y un panel de para realizar el cálculo de un sistema de puesta a tierra “SPT”, el cual se debe conectar sólidamente a uno existente que tiene un valor de resistencia por debajo de los requerimientos del proyecto. Estos cálculos se complementan con la distancia máxima a la cual se debe construir el nuevo SPT, se estipulan las posibles soluciones con electrodos verticales o electrodos horizontales.

En la Figura B- 1 se presenta el esquema de funcionamiento del software TOTAL GRID, donde se muestran las diferentes posibilidades que la herramienta computacional entrega al operario diseñador de sistemas de puesta a tierra.

Figura B- 1. Esquema de funcionamiento del TOTAL GRID.



2 PROGRAMACIÓN.

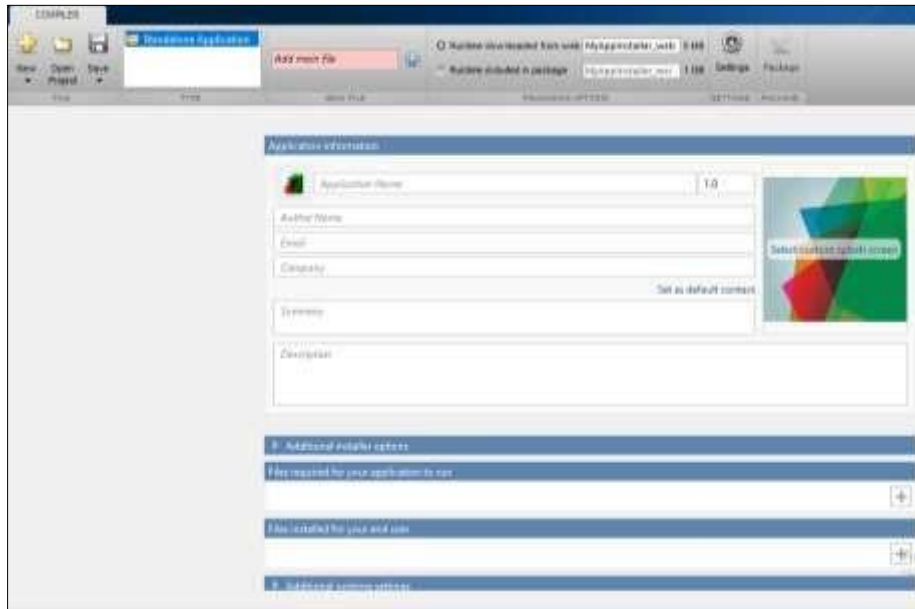
MATLAB permite la creación de programas con base matemáticas con ecuaciones o programación compleja, mediante el uso de un lenguaje propio. Este lenguaje puede ser visto y puede ser ejecutado mediante un archivo de script (archivo .m), a través de operaciones vectoriales, matriciales, de funciones y algoritmos complejos de cálculo.

3 INSTALACIÓN.

3.1 COMPILACIÓN.

La compilación del TOTAL GRID se realiza mediante el software MATLAB en su pantalla de “APPS” en versiones actuales, en el fichero “APPS” oprimiendo el botón “Application compiler” el cual despliega la ventana que se muestra en la Figura B- 2.

Figura B- 2. Application compiler. MATLAB.



Se debe seleccionar el archivo interfaz.m para ser agregado en la sección “**Add main file**”, en el icono “**icon displayed for the Application and the Application instaler**”, ver Figura B- 3, se debe seleccionar el archivo logo_transparente.png. En la barra “**Application name**” se debe dar nombre a la carpeta que se creara al compilar, es de gran importancia que dicho nombre debe ir sin espacios.

Figura B- 3. Icon displayed for the Application and the Application instaler.

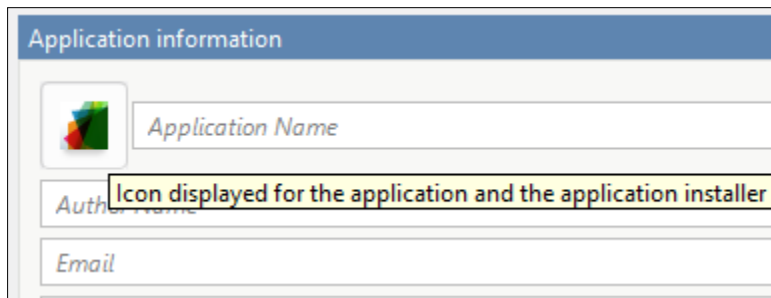


































Figura B- 4. Select custom splash screen.



En el icono **“Select custom splash screen”**, ver Figura B- 4, se seleccionará el archivo apertura_opt.jpg, este archivo es la imagen de inicio del TOTAL GRID. En la sección de **“file required for your Application to run”** se debe incluir los siguientes archivos:

- | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 
VARILLAS.fig | 
SUBVARILLA2.fig | 
SUBIEEEE.fig | 
resistividades.fig | 
REDISENO.fig |
| 
interfaz.fig | 
IEEE.fig | 
wordplacas.m | 
wordmallas.m | 
wordieee.m |
| 
wordestrellas.m | 
wordcontrapesos.m | 
wordcontra_antena
s.m | 
wordanillos.m | 
varillas_electrodo.m |
| 
VARILLAS.m | 
SUBVARILLA2.m | 
SUBIEEEE.m | 
resistividades.m | 
REDISENO.m |
| 
prueba_IEEE.m | 
prueba_cortes.m | 
mallas_sin_varillas.
m | 
mallas_con_varillas.
m | 
interfaz.m |
| 
IEEE.m | 
GetExecutableFolde
r.m | 
gestor_archivos.m | 
formulas_IEEE.m | 
conductor_enterrad
o.m |
| 
cables_en_cemento
_conductor.m | 
wordvarillas.m | | | |

Adicionalmente de las siguientes imágenes:



- Actu.png
- Ayuda.png
- Diseño.png
- Logo.png
- Malla.png
- Mejorador.png
- Resis.png
- Rg.png
- Save.png
- Sun.png
- Logo2.jpeg
- GIE.jpeg

En la sección “**files installed for your end user**” se deben adicionar los archivos siguientes:

- Ayuda.pdf
- Logo.png

Por último, se debe seleccionar el botón de “**runtime included in package**” y dar inicio a la compilación del software TOTAL GRID al oprimir “**PACKAGE**”.

4 COMPONENTES VISUALES.

El TOTAL GRID se compone de una pantalla inicial y seis (6) paneles que se activan dependiendo de la metodología de diseño a implementar. En la pantalla de inicio se tiene una ventana desplegable con seis (6) opciones, un botón de guardar informe y un botón de ayuda, como se muestra en la Figura B- 5 las cuales son:

- IEEE.
- Varilla.
- Electrodo horizontales.
- Placas.
- Mallas.
- Mejorar existente.

Figura B- 5. Pantalla de inicio.

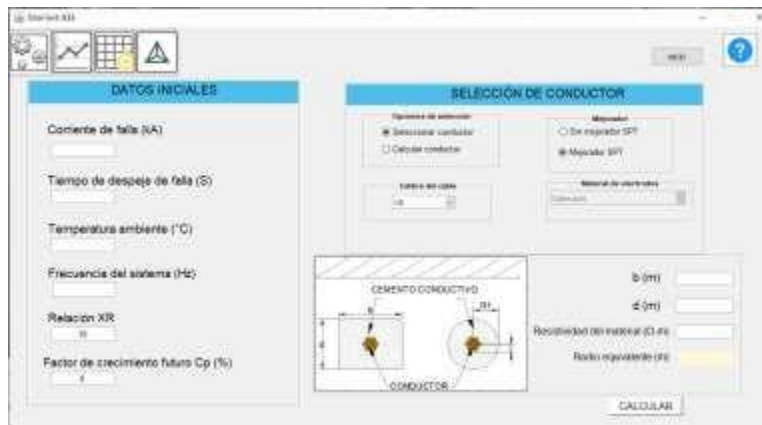


4.1 PANEL IEEE.

Al tomar la opción de IEEE de la pantalla inicio, emerge un panel en el cual se tiene una sección, para el ingreso de los datos requeridos para realizar los cálculos del sistema de puesta a tierra, como la corriente de corto circuito temperatura ambiente, relación X/R, entre otros como se presenta en la Figura B- 6.

En este panel también se puede realizar la selección del conductor, ya sea por criterio propio del diseñador activando la opción “seleccionar conductor o activar la opción “calcular conductor” mediante cálculo por ecuación, del cuadro “mejorador” al activar el botón “mejorador SPT” se presenta en la parte inferior derecha un recuadro con celdas de ingreso de las dimensiones de aplicación del material mejorador de puesta a tierra y la resistividad del mismo. En la parte superior izquierda de este panel se encuentran cuatro (4) botones para navegar por los paneles que conforman los cálculos por la metodología IEEE-80.

Figura B- 6. IEEE primer panel.



En la Figura B- 7, se muestra el segundo panel de la selección IEEE, en donde se presenta el análisis de los datos de resistividad, ya sea por el método de terreno de resistividad homogénea o por el de dos capas. De este mismo panel se puede acceder a un subpanel, en el cual se ingresa los datos de resistividad para una o dos rutas de medidas y hasta 5 medidas por ruta como se muestra en la Figura B- 8.

Figura B- 7. IEEE segundo panel.

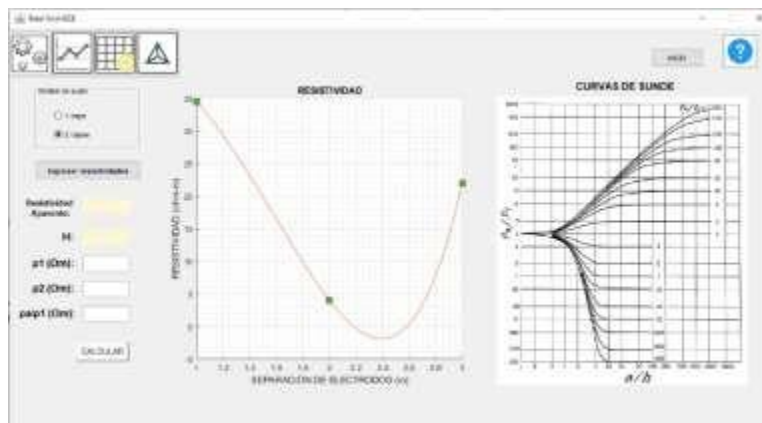


Figura B- 8. IEEE subpanel resistividad.

Resistividad [Ωm]

Separación [m]	Ruta 1	Ruta 2
1	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3	<input type="text"/>	<input type="text"/>
4	<input type="text"/>	<input type="text"/>
5	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Rellenar
 Vaciar

Resistividad ($\Omega\text{-m}$) por método BOX-COX
 (con probabilidad del 70% de no ser superada)

En el tercer panel se puede realizar el diseño de la rejilla a construir, ver Figura B- 9. Al oprimir el botón “nueva malla” se presenta un nuevo subpanel en el cual se introducen los puntos de coordenadas de la malla, pudiendo ser creadas mallas tipo cuadradas, rectangulares o en forma de L, como se muestra en la Figura B- 10.

Figura B- 9. IEEE tercer panel.

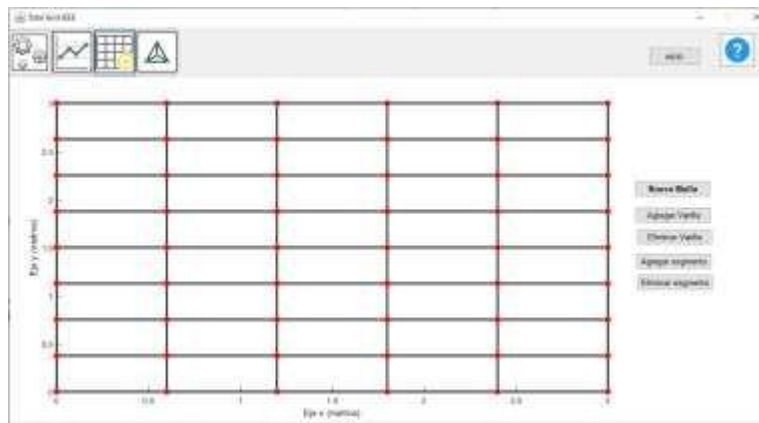


Figura B- 10. IEEE subpanel dimensiones malla.

DISEÑO DE MALLA

Panel

X Conductores en paralelo (Nx)

Y Conductores en paralelo (Ny)

Z Malla en L

En el tercer panel se realizan los cálculos finales de resistencia de puesta a tierra, tensiones tolerables, tensiones reales y el resultado de comparar las tensiones reales con las tolerables aprobando o rechazando el diseño, ver Figura B- 11.

Figura B- 11. IEEE cuarto panel.



The screenshot shows a software window titled 'IEEE'. It contains four main panels:

- CALCULO DE RESISTENCIA:** Includes a 'Método' dropdown menu set to 'IEEE', a 'Rg (Ω)' input field, and a 'CALCULAR' button.
- TENSIONES TOLERABLES:** Includes input fields for 'Isc (Clm)' and 'Isc (m)', a 'Tensión de toque (V)' input field, a 'Tensión de paso (V)' input field, and a 'CALCULAR' button.
- TENSIONES REALES:** Includes input fields for 'GPR (V)', 'Tensión de toque (V)', and 'Tensión de paso (V)', along with radio buttons for 'No hay mejoras' (selected) and 'Alta Inyección', and a 'CALCULAR' button.
- RESULTADOS:** A large empty area for displaying results, with a 'VALIDACIÓN' button and a 'GENERAR REPORTE' button at the bottom right.

4.2 PANEL ELECTRODOS VERTICALES.

Al tomar la segunda opción en la pantalla inicio el software remite al panel que se muestra en la Figura B- 12, en el cual se estipula el número de medidas de resistividad realizadas en cada ruta, también en este panel se toma la decisión de calcular la resistencia mediante electrodos con o sin mejoradores de puesta a tierra.

Figura B- 12. VARILLAS primer panel.

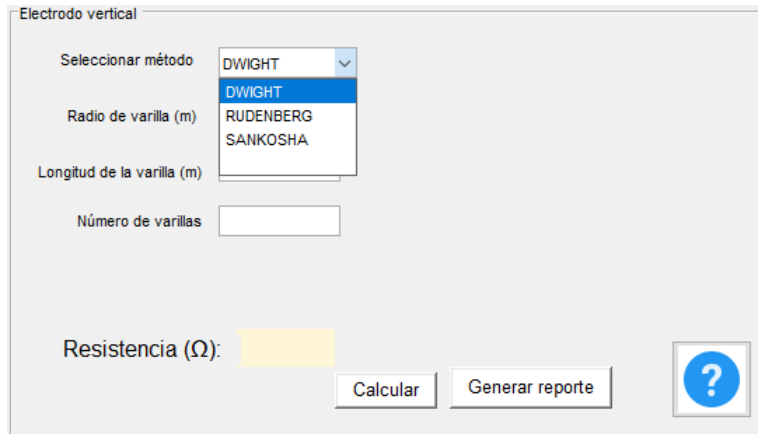


The screenshot shows a software window titled 'ELECTRODO VERTICAL'. It features the 'TOTALGRID software' logo and a header for 'FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍAS. INGENIERÍA ELÉCTRICA. GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA-GIE'. The main interface includes:

- A dropdown menu for 'Medidas de resistividad'.
- An input field for 'Profundidad (m)'.
- Radio buttons for 'Con tratamiento' (selected) and 'Sin tratamiento'.
- 'SIGUIENTE' and 'INICIO' buttons at the bottom.

En la Figura B- 13 se muestra el panel emergente al tomar la opción de calcular con electrodos sin un aditivo mejorador de puesta a tierra, este panel permite obtener el cálculo mediante tres diferentes ecuaciones.

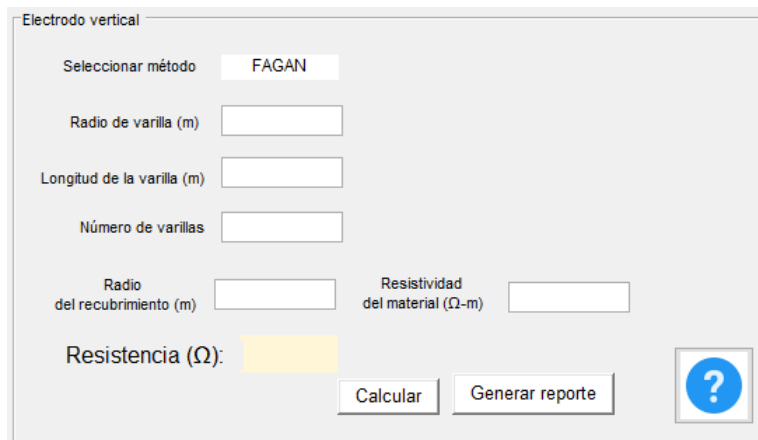
Figura B- 13. VARILLAS segundo panel.



The screenshot shows a software interface titled "Electrodo vertical". It features a dropdown menu for "Seleccionar método" with "DWIGHT" selected. Below it are input fields for "Radio de varilla (m)", "Longitud de la varilla (m)", and "Número de varillas". A "Resistencia (Ω)" field is highlighted in yellow. At the bottom right, there are "Calcular" and "Generar reporte" buttons, and a blue question mark icon.

Para el panel de la Figura B- 14 se presenta la interfaz para el cálculo de resistencia, usando varillas con mejorador de puesta a tierra.

Figura B- 14. VARILLAS tercer panel.

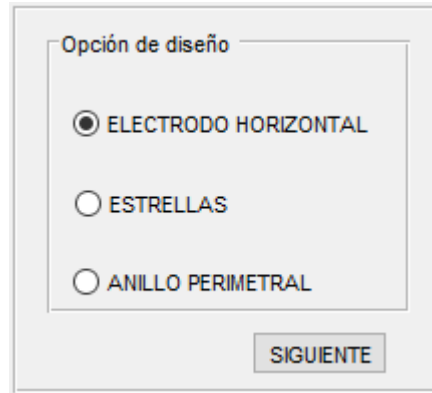


The screenshot shows a software interface titled "Electrodo vertical". The "Seleccionar método" dropdown is set to "FAGAN". It includes input fields for "Radio de varilla (m)", "Longitud de la varilla (m)", "Número de varillas", "Radio del recubrimiento (m)", and "Resistividad del material (Ω-m)". A "Resistencia (Ω)" field is highlighted in yellow. At the bottom right, there are "Calcular" and "Generar reporte" buttons, and a blue question mark icon.

4.3 PANEL ELECTRODOS HORIZONTALES.

Al tomar la opción “electrodos horizontales” de la pantalla inicio traslada al usuario al panel que se muestra en la Figura B- 12, al tomar la opción de electrodos sin tratamiento redirecciona al panel de la Figura B- 15, en el cual permite tomar la opción de cálculo de resistencia mediante tres tipos de configuraciones diferentes de conductores horizontales.

Figura B- 15. ELECTRODO HORIZONTAL primer panel.



Las diferentes opciones presentes en el panel anterior, dirige a los paneles presentados en la Figura B- 16 para los electrodos horizontales, Figura B- 17 para las configuraciones tipo estrella y la Figura B- 18 para anillos perimetrales a las estructuras a proteger. Un cálculo que es común en los tres paneles mencionados anteriormente, es la longitud efectiva del electrodo horizontal que se ve afectada por la resistividad del terreno y la corriente pico del rayo.

Figura B- 16. ELECTRODO HORIZONTAL segundo panel.

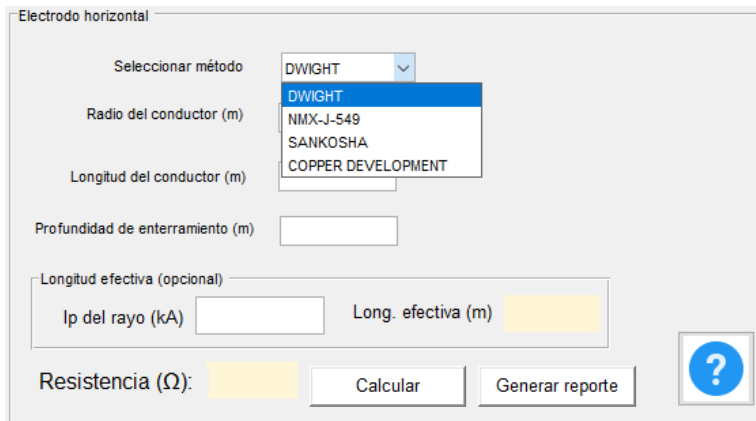


Figura B- 17. ELECTRODO HORIZONTAL tercer panel.

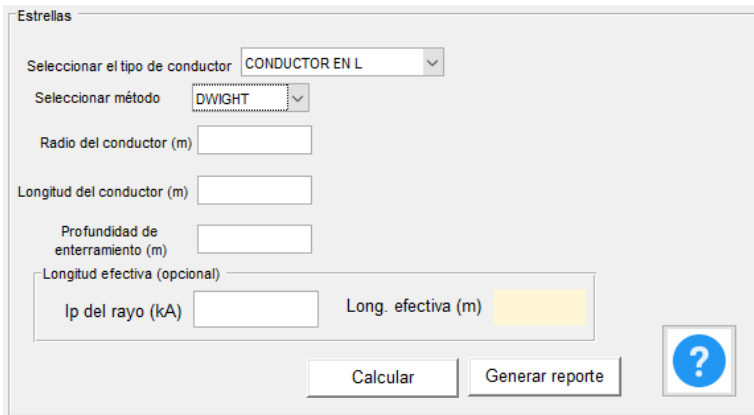
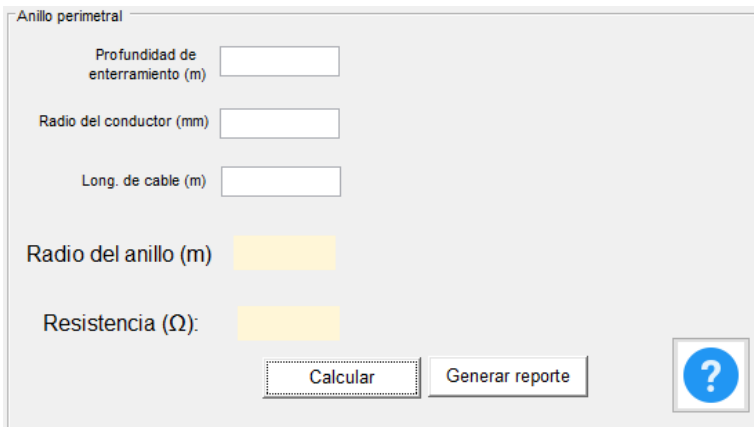


Figura B- 18. ELECTRODO HORIZONTAL cuarto panel.



La opción de calcular la resistencia de puesta a tierra mediante el uso de cable recubierto por un material mejorador de puesta a tierra, conduce al panel de la Figura B- 19 en donde se toma la elección del tipo de configuración a utilizar, electrodos horizontales como se observa en la Figura B- 20 o la configuración de contra-antenas cuyo panel de cálculo se muestra en la Figura B- 21.

Figura B- 19. ELECTRODO HORIZONTAL quinto panel.

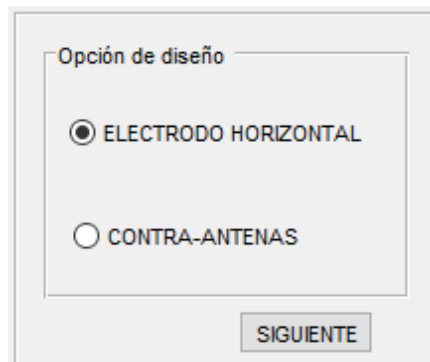


Figura B- 20. ELECTRODO HORIZONTAL sexto panel.

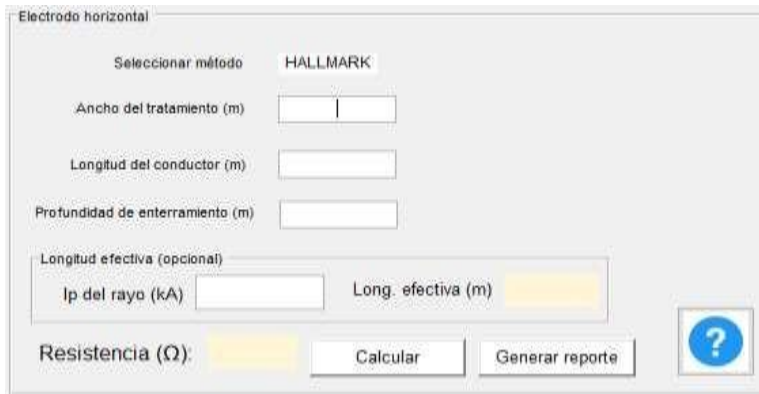
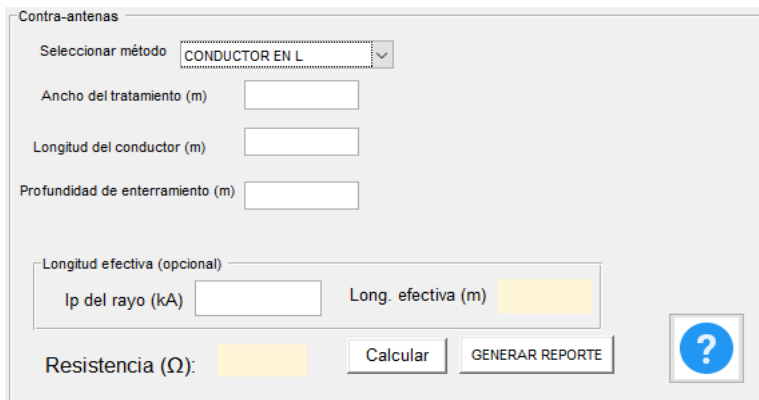


Figura B- 21. ELECTRODO HORIZONTAL séptimo panel.



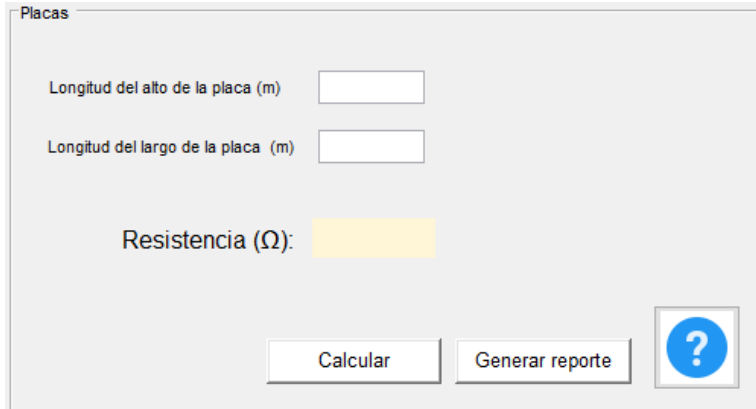
4.4 PANEL PLACAS.

La cuarta opción de la pantalla inicio direcciona al usuario hasta el panel descrito en la Figura B- 22, en el cual se ingresa el número de medidas de resistividad por cada ruta realizada y la profundidad de la primera medida. En la Figura B- 23 se muestra el panel de cálculo de resistencia con placas metálicas.

Figura B- 22. PLACAS primer panel.



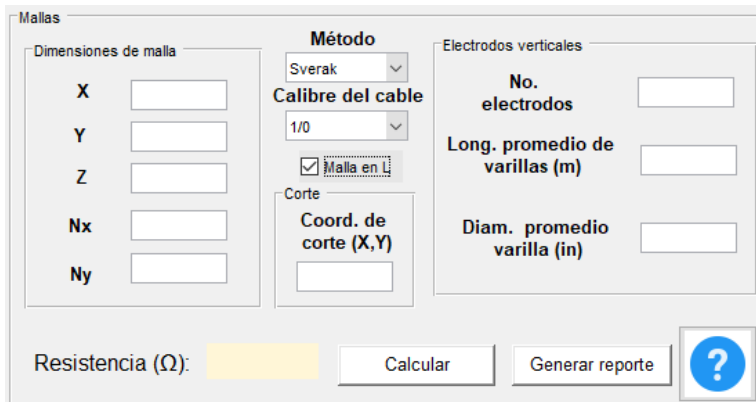
Figura B- 23. PLACAS segundo panel.



4.5 PANEL MALLAS.

La necesidad de diseñar rejillas de puesta a tierra sin la necesidad del cálculo de las tensiones de paso y contacto como se formula en el estándar IEEE-80, se puede suplir con la quinta opción de la pantalla de inicio, en la Figura B- 24 se muestra el panel de cálculo de resistencia de mallas de puesta a tierra mediante las ecuaciones de Sverak y de Schwarz, para configuraciones rectangulares, cuadradas y en forma de L.

Figura B- 24. MALLAS primer panel.



4.6 PANEL MEJORAR SPT EXISTENTE.

La última opción que se presenta en la pantalla inicial del TOTAL GRID hace alusión al cálculo de un sistema de puesta a tierra en paralelo a uno existente, cuyo valor de resistencia no satisface los requerimientos del proyecto. En la Figura B- 25 se muestra el panel en el cual se ingresan los datos de la resistencia existente, la resistencia objetivo la

corriente de falla y tiempo de despeje de falla. En este panel se toma la decisión sobre cual configuración se desea realizar el mejoramiento del sistema existente, ya sea mediante la implementación de electrodos verticales o electrodos horizontales.

Figura B- 25. MEJORAR EXISTENTE primer panel.



MEJORAR SPT EXISTENTE

Mejora de diseño

Resistencias

Resistencia objetivo (Ω)

Resistencia medida (Ω)

Resistencia de diseño (Ω)

Datos de corriente de falla

Corriente de falla (A) Tiempo de despeje (s)

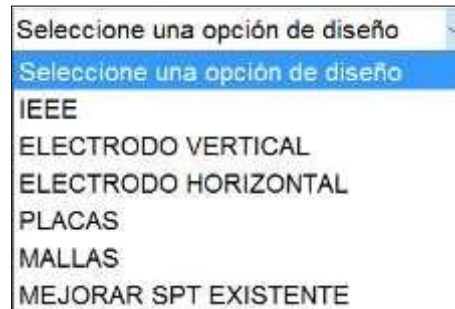
Opción de diseño

5 FUNCIONAMIENTO.

5.1 PANTALLA DE INICIO.

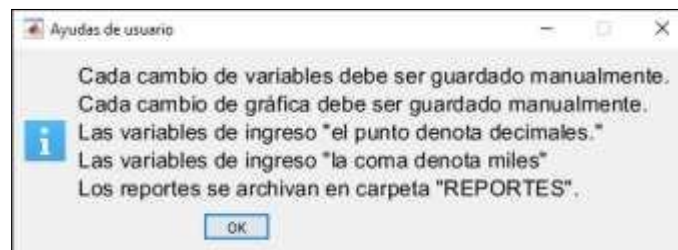
Para ingresar a los paneles de cálculo de resistencia, se debe seleccionar una de las metodologías que se muestra en la Figura B- 26 de la pantalla inicial, para completar la orden se debe oprimir el botón de “INICIAR” después de haber realizado la elección.

Figura B- 26. Ventana selección pantalla inicio.




El botón de ayuda de la pantalla inicio, el cual se presenta como un signo de interrogante “?” visualiza una ventana que entrega unas pautas para el registro de datos y cálculo de los diferentes módulos en conjunto a imágenes de las configuraciones de puesta a tierra que se encontrarán en el software, como se muestra en la Figura B- 28.

Figura B- 27. Ayudas de usuario.

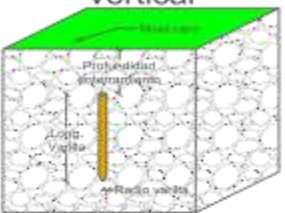


El botón de “GUARDAR”, cuyo reconocimiento se debe a su símbolo en forma de disquete, da la opción al usuario de seleccionar una dirección dentro del computador para crear una carpeta llamada “INFORME”, que guardará en futuros usos los informes creados en cada uno de los paneles de cálculo.

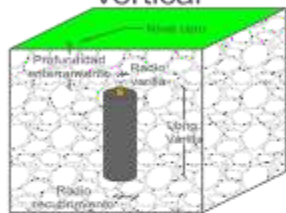
Figura B- 28. Información ayuda al usuario.




Electrodo vertical



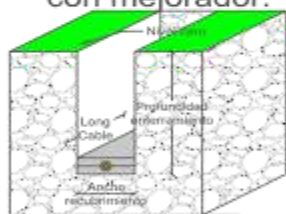
Electrodo vertical



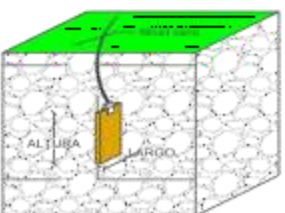
Electrodo horizontal



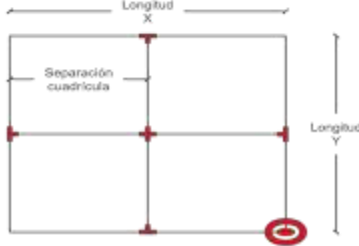
Electrodo horizontal con mejorador.



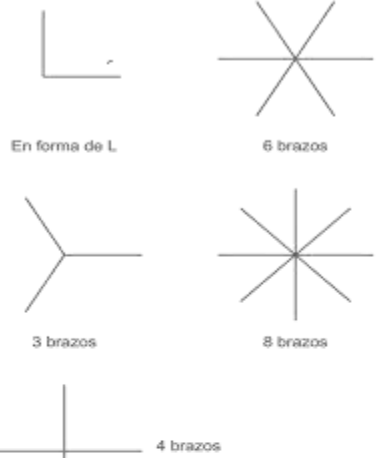
Electrodo tipo placa



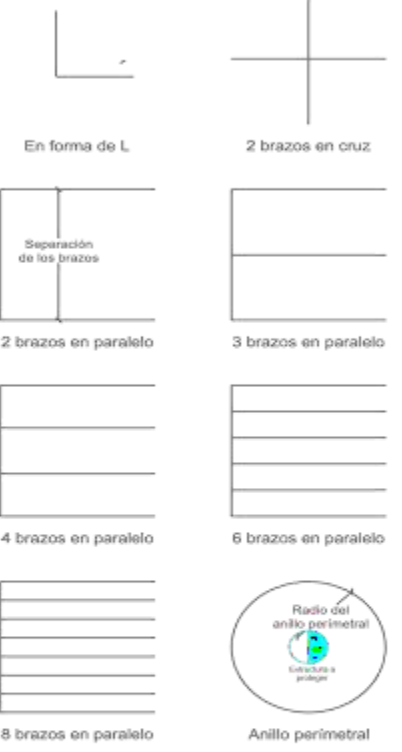
Dimensiones malla



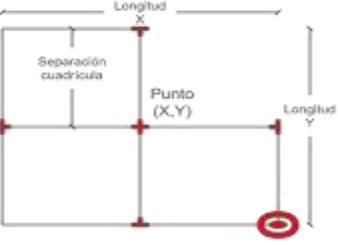
Topologías tipo estrella

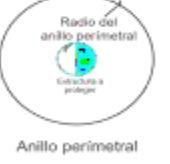


Topologías tipo contratenas



Dimensiones malla





El software TOTAL GRID está diseñado bajo los siguientes parámetros:

- Cada cambio de variables debe ser guardado manualmente.
- Cada cambio de gráficos debe ser guardado manualmente.
- En las variables de ingreso "el punto denota decimales y las comas denota miles.
- Los reportes se archivan en la carpeta "REPORTES" cuya ubicación es seleccionada por el usuario; en caso de no hacerlo, se notificará su ubicación.
- Cada reporte se nombrará automáticamente dependiendo del diseño en el que se haya generado; en caso de no generarse debidamente, elimine la carpeta reportes y vuelva a intentarlo.

5.2 IEEE.

El usuario al entrar al módulo de cálculo mediante el estándar IEEE-80 se encuentra con cuatro (4) paneles para el cálculo de resistencia de puesta a tierra en subestaciones.

5.2.1 PRIMER PANEL

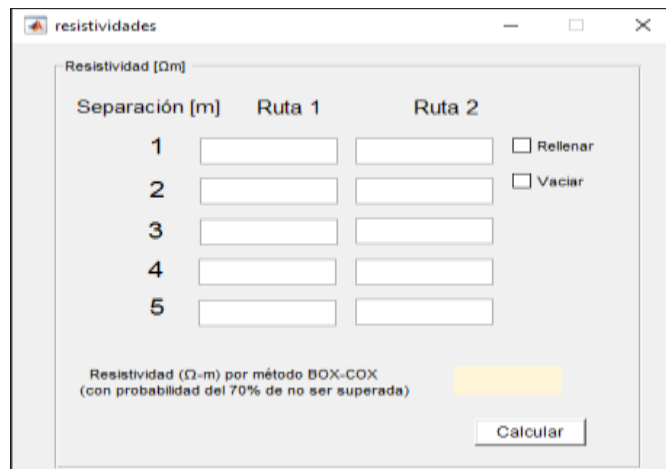
En este panel se encuentra el recuadro “DATOS INICIALES” conteniendo un conjunto de celdas para el ingreso de datos necesarios para los cálculos posteriores. De gran relevancia la celda del factor C_p el cual por defecto se toma un valor de 0, de tener una proyección de aumento de la subestación en dicha celda se debe ingresar el porcentaje de la misma.

En el recuadro “SELECCIÓN DE CONDUCTOR” se presentan las opciones de selección del calibre del conductor a implementar, ya sea por criterio del diseñador seleccionando un calibre en la ventana “Calibre del cable”, mediante cálculo con la opción “Calcular conductor” y seleccionando el material con el cual se constituye los electrodos a usar en la ventana “Material de electrodos”, por último, al activar la opción “Mejorador SPT” se despliega un grupo de celdas en donde se dan las dimensiones de aplicación del material mejorador de puesta a tierra y la resistividad del mismo. Por último, se debe oprimir el botón de “CALCULAR” para que el software guarde las variables ingresadas.

5.2.2 SEGUNDO PANEL

En este panel el usuario realiza el tratamiento a las medidas de resistividad realizadas previamente mediante el método de una capa o el de dos capas. Al seleccionar el método de una capa se activará la ventana que se muestra en la Figura B- 29.

Figura B- 29. Cálculo resistividad método BOX-COX.



The screenshot shows a software window titled "resistividades" with a standard Windows interface (minimize, maximize, close buttons). The window contains a form for calculating resistivity using the BOX-COX method. The form is titled "Resistividad [Ω -m]" and has a table with the following structure:

Separación [m]	Ruta 1	Ruta 2
1	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3	<input type="text"/>	<input type="text"/>
4	<input type="text"/>	<input type="text"/>
5	<input type="text"/>	<input type="text"/>

To the right of the table, there are two checkboxes: "Rellenar" (checked) and "Vaciar" (unchecked). Below the table, there is a text label: "Resistividad (Ω -m) por método BOX-COX (con probabilidad del 70% de no ser superada)". At the bottom right of the form, there is a yellow rectangular area and a "Calcular" button.

El TOTAL GRID permite el ingreso de datos de 5 medidas de resistividad de hasta 2 rutas de medida, en caso de que el usuario solo haya realizado una única ruta de medida, al oprimir el espacio de rellenar, el programa automáticamente copia los valores entregados en la primera ruta. Luego de ingresar los datos de resistividad y oprimir el botón “CALCULAR” el software entrega el valor de resistividad calculado mediante el método probabilístico de BOX-COX. En el panel de resistividad se presenta una gráfica con los valores promedio de la resistividad de las capas del suelo entre las dos rutas de medida.

El método de dos (2) capas o de Sunde, es un método visual, se inicia con el ingreso de los datos de resistividad en la ventana emergente, en la ventana “RESISTIVIDAD” se selecciona el valor de resistividad para la capa 1 y 2, incluyendo los valores seleccionados en las celdas correspondientes. Oprimiendo el botón “CALCULAR” se visualiza una ventana que da el cálculo de dividir la resistividad de la capa 2 en la capa 1, con este valor se selecciona una curva de la gráfica de Sunde, de no existir se debe interpolar una gráfica que satisfaga el resultado obtenido.

Se debe seleccionar un valor en el eje X ρ_a/ρ_1 de la gráfica que corte el centro de la pendiente de la curva, este valor se incluye en la celda “ ρ_a/ρ_1 ”. Después de realizar los pasos anteriores se debe oprimir de nuevo el botón de “CALCULAR” para obtener el resultado final de resistividad.

El valor de la primera capa se plasma en la celda “Resistividad aparente” cuya profundidad se presenta en la celda “H” y la resistividad de la capa 2 será la misma entregada por el usuario inicialmente.

5.2.3 TERCER PANEL

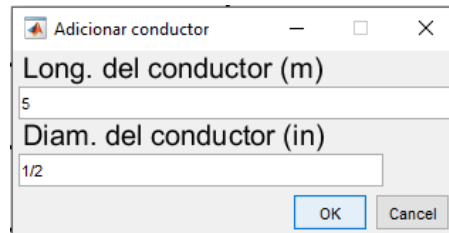
En el tercer panel se presenta una interfaz de diseño para la rejilla a ser analizada, al oprimir el botón de “Nueva Malla” se despliega una ventana que se muestra en la Figura B- 30, en su interior se tiene un grupo de celdas para incluir los puntos referencia de la malla en un eje X-Y e incluyendo la profundidad de enterramiento de la misma, también se debe incluir en número de conductores en paralelo a los ejes X y Y. Con lo anteriormente descrito se pueden construir mallas de forma cuadrada y rectangular, al oprimir el botón “Malla en L” aparece una celda en donde se incluye una coordenada (X, Y), la cual será una referencia para dar la forma en L.

Figura B- 30. Dimensiones de la rejilla.



Al tener ya construida la rejilla de conductores horizontales, si es requerido por el proyecto se puede realizar la inclusión de electrodos verticales mediante el botón “Agregar Varilla” y señalando un punto de ubicación del electrodo, el valor numérico del diámetro de la varilla se puede escribir de forma decimal o en forma fraccionaria, posteriormente aparece la ventana que se muestra en la Figura B- 31, en donde se dan las dimensiones de las varillas, con el botón “Eliminar Varilla” se pueden eliminar electrodos verticales. De ser requerido se puede adicionar segmentos de conductores horizontales mediante el botón “Agregar Segmento” o eliminar segmentos mediante el botón “Eliminar Segmento”, denotando dos puntos cualesquiera en el área de diseño.

Figura B- 31. Dimensiones de varillas.



5.2.4 CUARTO PANEL

En el cuarto y último panel de este módulo el usuario realiza los cálculos finales y el análisis de los resultados obtenidos. En el recuadro “CÁLCULO DE RESISTENCIA” se puede obtener la resistencia de puesta a tierra mediante tres (3) diferentes métodos (Sverak, Schwarz, Electrodo horizontal con mejorador), este último debe incluir los datos del material mejorador del primer panel.

En el recuadro “TENSIONES TOLERABLES” se debe ingresar los datos del material que se adicionará en la superficie del terreno, para aumentar la resistencia de aislamiento de las personas que se encuentran en la subestación, luego de ello se debe seleccionar sobre qué criterio de diseño se va a realizar el cálculo ya sea el de 50 kg o el de 70 kg, por último, se debe oprimir el botón “CALCULAR” de este mismo recuadro para determinar las tensiones tolerables.

En el recuadro “TENSIONES REALES” se tiene que realizar una selección dependiendo del tipo de proyecto a diseñar, la opción “Media tensión” determina en el algoritmo de programación que la variable Sf (factor de división de corriente) sea iguala a uno (1), para proyectos en donde las líneas de llegada y salida de la subestación no tenga cable de guarda. La opción “Alta tensión” visualiza una ventana para ingresar la impedancia en paralelo de las líneas de entrada y salida de la subestación, dicho valor puede ser ingresado de forma rectangular usando el operador imaginario i para la parte imaginaria. Al finalizar se activa el botón “CALCULAR” para obtener los valores de GPR, tensión de paso y tensión de contacto.

La validación de los cálculos se realiza activando el botón “VALIDACIÓN”, con el cual se visualizarán dos señales dependiendo de las condiciones de las tensiones: “DISEÑO NO

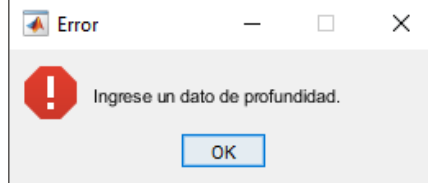
VALIDO PARA IMPLEMENTACIÓN” cuando algunas de las tensiones tolerables son inferiores a las reales o “DISEÑO VÁLIDO PARA IMPLEMENTACIÓN” de ser las tensiones tolerables mayores a las reales.

5.3 ELECTRODOS VERTICALES.

El módulo de electrodos verticales presenta un primer panel que se muestra en la Figura B- 12, en el cual se debe ingresar el número de medidas de resistividad realizadas y la profundidad de sondeo de la primera medida. En el segundo recuadro se debe hacer la selección entre electrodos con o sin material mejorador, al tomar la decisión e incluir los datos en resistividad se activa el botón “SIGUIENTE”, al momento de requerirse ir de nuevo a la pantalla inicial se debe oprimir el botón “INICIO”.

Al momento de dar “SIGUIENTE” sin haber ingresado datos de profundidad de la resistividad, se despliega una ventana de error con la leyenda “Ingrese un dato de profundidad” como se muestra en la Figura B- 32.

Figura B- 32. Señal de error en resistividad.

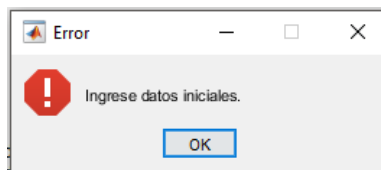


5.3.1 ELECTRODO VERTICAL SIN MEJORADOR

La selección de electrodo vertical sin mejorador activa el panel que se muestra en la Figura B- 13, en el cual al oprimir “Seleccionar método” se despliega una ventana con 3 opciones de cálculo, posteriormente se ingresa los datos requeridos para obtener el valor de resistencia requerido al presionar el botón “Calcular”. De ser necesario el cálculo de la resistencia al incluir un mayor número de electrodos verticales, se debe aumentar el número de ellos en la celda “Número de varillas” y pulsar nuevamente “Calcular”.

De no ingresar datos en algunas de las celdas requeridas, la herramienta visualizara una ventana con una señal de error como se observa en la Figura B- 33.

Figura B- 33. Señal error ingreso de datos.



Por último, se puede crear un archivo en formato PDF con los datos ingresados y los resultados obtenidos, al presionar el botón “Generar reporte”.

5.3.2 ELECTRODO VERTICAL CON MEJORADOR

El seleccionar electrodos verticales con mejorador activa el tercer panel que se muestra en la Figura B- 14, en él se realiza el cálculo de resistencia mediante la ecuación de Hallmark, ingresando los datos del electrodo vertical, cantidad de electrodos, resistividad del material mejorador y las dimensiones de implementación en las celdas respectivas. Después de ingresar los datos se presiona el botón de “Calcular” para obtener el valor de resistencia, también en este panel se puede realizar la impresión de un reporte en formato PDF mediante el botón “Generar reporte”.

5.4 ELECTRODOS HORIZONTALES.

El módulo de electrodos horizontales lleva al panel de la Figura B- 12, en donde se seleccionará la metodología de cálculo, ya sea con electrodos con material mejorador o sin dicho material. Luego de tomar la opción de la metodología a seguir, se debe pulsar el botón de “SIGUIENTE”; si el usuario requiere devolverse a la pantalla inicio se debe oprimir el botón de “INICIO”.

5.4.1 ELECTRODO HORIZONTAL SIN MEJORADOR

En el panel de la Figura B- 15 se tienen tres opciones para el cálculo de resistencia con electrodos horizontales, para acceder a cualquiera de ellas se debe seleccionar y oprimir el botón “SIGUIENTE”.

- Electrodo horizontal

El subpanel de electrodo horizontal se visualiza la Figura B- 16, en este panel se puede hacer la computación de la resistencia mediante tres (3) diferentes ecuaciones, al seleccionar cualquiera de ellas e ingresar los datos requeridos en dicho panel, por último, activar el botón de “Calcular”. También en este panel se puede realizar la impresión de un reporte en formato PDF mediante el botón “Generar reporte”.

- Estrellas

En la imagen de la Figura B- 17 se observa la interfaz para el subpanel de puestas a tierra tipo estrella, en él se pueden seleccionar diferentes topologías en la ventana desplegable e ingresando los datos requeridos para el cálculo a realizar y oprimiendo el botón de “Calcular”. En este mismo espacio de ser requerido por el usuario, se puede calcular la longitud efectiva que debe tener el electrodo horizontal, el no cálculo de dicha distancia no

constituye una condición para el cálculo de la resistencia. También en este panel se puede realizar la impresión de un reporte en formato PDF mediante el botón “Generar reporte”.

- Anillo perimetral

En este subpanel se ingresan los datos necesarios para el cálculo en las celdas correspondientes, al dar calcular en el respectivo botón del software, se entregará el valor de resistencia calculado además del radio de la circunferencia que se debe construir con respecto a la longitud de conductor ingresada. Por último y de ser necesario se puede guardar el cálculo realizado con el botón “Generar reporte” en un documento en formato PDF.

5.4.2 ELECTRODO HORIZONTAL CON MEJORADOR

Para el panel de electrodo horizontal con mejorador de puesta a tierra se presentan dos opciones electrodos: electrodos horizontales y topologías tipo contra-antenas. Ver Figura B- 19. Para el subpanel de la topología tipo contra-antenas se debe seleccionar la configuración a la cual se realizará el diseño e ingresar los datos requeridos para el cálculo. Al oprimir el botón de “Calcular” se obtiene el valor de resistencia computado. Para el subpanel de electrodo horizontal no se tienen opciones de configuraciones por ello se requiere únicamente del ingreso de datos y pulsar el botón “Calcular”.

5.5 PLACAS.

Para el módulo de placas se activa el panel mostrado en la Figura B- 22, en el cual se determina el número de medidas de resistividad y la profundidad de sondeo de la primera medida. Al oprimir el botón siguiente se activará el panel de la Figura B- 23, en donde se encuentran dos celdas para el ingreso de las dimensiones de la placa a ser utilizada, junto al botón “Calcular” para determinar la resistencia de puesta a tierra y el botón “Generar reporte” para crear el archivo de formato PDF.

5.6 MALLAS.

La opción de mallas en la pantalla inicial activa el panel mostrado en la Figura B- 22, posteriormente en el primer panel se puede tener la opción de calcular la resistencia de mallas mediante las ecuaciones de Sverak y de Schwarz, para rejillas de electrodos horizontales o el combinatorio de electrodos horizontales y verticales.

En el recuadro “Long. de malla” se presentan las celdas para ingresar las dimensiones de la malla de la siguiente manera:

X: Largo de la malla.

Y: Ancho de la malla.

Z: Profundidad de enterramiento.

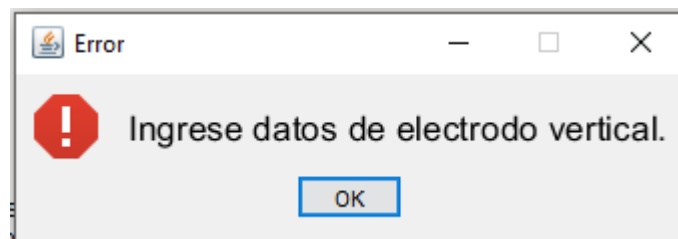
Nx: Cables en paralelo al lado mayor de la malla.

Ny: Cables en paralelo al lado menor de la malla.

En el recuadro “Varillas” se introducen las dimensiones de los electrodos a implementar en la rejilla y el número de varillas a usar. Al activar la ventana desplegable “Calibre del cable” se encuentran los calibres típicos que se utilizan como electrodos horizontales. Al seleccionar la celda de “Malla en L” se activará una celda para introducir la coordenada (X, Y) para formar una malla en forma de L como se muestra en la pantalla de ayuda, ver Figura B- 27.

Por último, al tener los datos requeridos se presiona el botón “Calcular” para tener el valor de resistencia para los datos ingresados, en este panel también se tiene el botón de “Generar reporte”. Al tomar la opción de diseño por el método de Schwarz se debe incluir por lo menos un electrodo vertical, de lo contrario el software mostrará una alerta como se muestra en la Figura B- 34.

Figura B- 34. Alerta ingreso de electrodo vertical.



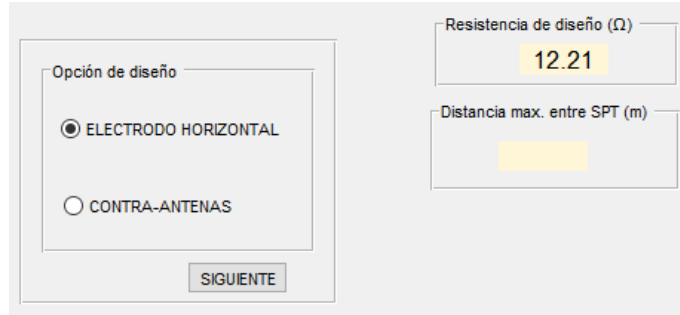
5.7 MEJORAR SPT EXISTENTE.

En el último módulo que se presenta en la Figura B- 25 se realiza el cálculo de un sistema de puesta a tierra que se conecta a otro existente, cuyo valor de resistencia excede los valores que son requeridos por el proyecto. Al ingresar los valores de resistencia objetivo, medida y al presionar el botón “Calcular” se presenta el valor de resistencia que debe tener el nuevo sistema de tierras a calcular. En la ventana emergente se tienen dos opciones para diseñar el sistema de tierras a implementar, electrodos horizontales o electrodos verticales. Para acceder a cualquiera de estas opciones se debe seleccionar alguna de ellas y oprimir el botón “IR A DISEÑO”. Adicionalmente, se puede encontrar en este panel el recuadro “Datos de corriente de falla”, en el cual se ingresan los datos de la magnitud de la corriente de falla del sistema, y el tiempo de despeje de falla de la misma.

Los subpaneles de diseño ya sea por electrodos horizontales o verticales con sus divisiones de electrodos con mejorador o sin este, presentan las mismas interacciones de cálculo vistas en los numerales anteriores, con la diferencia de la presencia de los valores de resistencia objetivo y una celda con el valor de la distancia máxima a la cual se debe

construir el sistema de puesta a tierra nuevo con respecto al existente, como se muestra en la Figura B- 35 y la Figura B- 36.

Figura B- 35. MEJORAR SPT EXISTENTE panel electrodo horizontal.



The screenshot shows a software panel for horizontal electrode design. On the left, under 'Opción de diseño', there are two radio buttons: 'ELECTRODO HORIZONTAL' (selected) and 'CONTRA-ANTENAS'. A 'SIGUIENTE' button is at the bottom. On the right, there are two input fields: 'Resistencia de diseño (Ω)' with the value '12.21' and 'Distancia max. entre SPT (m)' which is empty.

Figura B- 36. MEJORAR SPT EXISTENTE panel electrodo vertical.



The screenshot shows a software panel for vertical electrode design. On the left, under 'Electrodo vertical', there is a dropdown menu for 'Seleccionar método' set to 'DWIGHT', and three input fields for 'Radio de varilla (m)', 'Longitud de la varilla (m)', and 'Número de varillas'. On the right, there are two input fields: 'Resistencia de diseño (Ω)' with the value '22.403' and 'Distancia max. entre SPT (m)' which is empty. At the bottom, there is a 'Resistencia (Ω):' field and two buttons: 'Calcular' and 'Generar reporte'.