

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad De Ingeniería En Ciencias Aplicadas Carrera De Ingeniería En Mantenimiento Eléctrico

DETERMINACIÓN DE UN MODELO BIESTRATIFICADO A UTILIZARSE EN PROYECTOS ELÉCTRICOS PARA LAS PUESTAS A TIERRA DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN Y CÁMARAS ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO DE UN SOFTWARE COMPUTACIONAL

Trabajo de grado presentado ante la Universidad Técnica del Norte previo a la obtención del título de grado de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico

Autor:

Byron Fernando Chiriboga Lugo

Director:

MSc. Isabel Marina Quinde Cuenca

Ibarra, 2021



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información.

DATOS DEL CONTACTO			
CEDULA DE IDENTIDAD:	1003676184		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Chiriboga Lugo Byron Fernando		
DIRECCIÓN:	Colinas Del Sur 5 De Junio 6-41 Y Lázaro Condo		
E - MAIL:	bfchiribogal@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	2631059	TELÉFONO MÓVIL:	0983013843

DATOS DE LA OBRA	
TITULO:	Determinación de un modelo biestratificado a utilizarse en proyectos eléctricos para las puestas a tierra de transformadores de distribución y cámaras eléctricas mediante el uso de un software computacional
AUTOR:	Chiriboga Lugo Byron Fernando
FECHA:	25/10/2021
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	Pregrado
TITULO POR EL QUE SE OPTA:	Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico
TUTOR:	MSc. Isabel Marina Quinde Cuenca

2. CONSTANCIA

El autor Chiriboga Lugo Byron Fernando manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 25 días, del mes de octubre del 2021

EL AUTOR



Nombre: Chiriboga Lugo Byron Fernando

C.I: 10003676184



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

Ibarra, 13 de octubre del 2021

Yo, Isabel Quinde en calidad de directora del trabajo de grado del señor estudiante: Chiriboga Lugo Byron Fernando certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: "DETERMINACIÓN DE UN MODELO BIESTRATIFICADO A UTILIZARSE EN PROYECTOS ELÉCTRICOS PARA LAS PUESTAS A TIERRA DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN Y CÁMARAS ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO DE UN SOFTWARE COMPUTACIONAL" para la obtención del título Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico; aprobado la defensa, impresión y empastado.



firmado digitalmente por:
**ISABEL MARINA
QUINDE CUENCA**

DIRECTOR:

MSc. Isabel Marina Quinde Cuenca

C.I.: 180313677-7

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación está dedicado a Dios, por darme salud y vida para poder concluir con éxito la meta propuesta. A mi esposa e hija que han sido mi motor e inspiración para poder seguir adelante. Finalmente, a mi familia que ha estado conmigo durante este arduo camino.

Byron Fernando Chiriboga Lugo

AGRADECIMIENTO

A Dios y mi familia, por haberme dado la oportunidad de formarme en esta prestigiosa universidad y haber sido mi apoyo durante todo este tiempo.

Agradezco a la Universidad Técnica del Norte, y a todos los docentes que formaron parte de mi formación profesional, en especial a la MSc. Isabel Quinde, quien me ha guiado con sus valiosos conocimientos y permitió el desarrollo de este gran trabajo.

Byron Fernando Chiriboga Lugo

TABLA DE CONTENIDO

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA	II
CONSTANCIA.....	III
CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO.....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO	VI
TABLA DE CONTENIDO	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XIV
RESUMEN.....	XV
ABSTRACT	XVI
INTRODUCCIÓN	XVII
1. TEMA O TÍTULO.....	XVII
2. EL PROBLEMA.....	XVII
3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	XVIII
4. OBJETIVOS	XVIII
a) Objetivo General	XVIII
b) Objetivos Específicos.....	XVIII
5. ALCANCE.....	XIX
6. LIMITACIONES	XIX
7. JUSTIFICACIÓN – Detalle del Impacto (viabilidad)	XIX
8. CONTEXTO	XX
CAPÍTULO I	1
Marco teórico.....	1
1.1. Puesta a tierra.....	1
1.2. Objetivo de las puestas a tierra	2
1.3. Clasificación de los suelos.....	2
1.3.1. Factores que influyen en la resistividad del suelo	4

1.3.2.	Resistividad del suelo o terreno	7
1.3.3.	Técnicas para la medición de la resistividad del terreno	7
1.3.3.1.	Método de variación de profundidad	7
1.3.3.2.	Método de cuatro puntos	8
1.3.3.2.1.	Método de Wenner	9
1.3.3.2.1.1.	Arreglos del método de Wenner	9
1.3.3.2.2.	Método de Schlumberger	10
1.3.4.	Ventajas y desventajas de los métodos de medición	11
1.3.4.1.	Método de variación de profundidad	11
1.3.4.2.	Método de cuatro puntos	12
1.3.4.2.1.	Ventajas del método de Wenner	12
1.3.4.2.2.	Ventajas del método de Schlumberger	13
1.3.5.	Consideraciones antes de realizar las mediciones en campo	13
1.4.	Modelamiento del Suelo	14
1.4.1.	Modelo suelo homogéneo	14
1.4.2.	Modelo estratificado de suelo no homogéneo	14
1.4.2.1.	Modelo de suelo de dos capas (Biestratificado)	15
1.4.2.2.	Modelo de suelo de dos capas por el método gráfico de Shunde	16
1.5.	Malla a tierra.	17
1.5.1.	Métodos para la medición de la resistencia de una malla a tierra	17
1.5.1.1.	Método de dos puntos	18
1.5.1.2.	Método de tres puntos	18
1.5.1.3.	Método de caída de potencial o método del 62%	19
	CAPITULO II	21
	2. DESARROLLO	21
	2.1 INSTALACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA PARA REDES ELÉCTRICAS, TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN	21
	2.2 CÁLCULOS PARA EL DISEÑO DE PUESTAS A TIERRA DE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN PARA PROYECTOS ELÉCTRICOS	23

2.3	CÁLCULO DEL CALIBRE DEL CONDUCTOR PARA TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN.....	23
2.4	CONDUCTOR DE COBRE DESNUDO DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN.....	25
2.4.1	CÁLCULO DE CONDUCTOR PARA TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS	25
2.4.2	CÁLCULO DE CONDUCTOR PARA TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS	26
2.5	DETERMINACIÓN DE LA RESISTIVIDAD APARENTE DEL SUELO MEDIANTE LA FÓRMULA DE HUMMEL.....	28
2.6	VALORES RECOMENDADOS DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA.....	31
2.6.1	Cálculo de la resistencia de puesta a tierra	32
2.7	MEJORAMIENTO EN PUESTAS A TIERRA PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN 34	
2.7.1	Aumento del número de electrodos	34
2.7.2	Mejoramiento de la resistencia de puesta a tierra mediante el aumento de la longitud de la varilla de cobre	34
2.7.3	Adecuación de la resistividad del terreno según las normas IEEE Std 80-2000	35
2.7.3.1	Ejemplo de modo uso de mejorador de suelo a base de bentonita (GEM Cadweld de Erico).....	37
2.7.3.2	Instrucciones instalación en zanjas.....	37
2.7.3.3	Barras Químicas	39
2.8	DISPOSICIÓN DE LAS VARILLAS COPPERWELD DETERMINADAS POR EL NEC ECUATORIANO	41
2.8.1	Disposición 1 (T1 – 1) (1 Varilla enterrada verticalmente).....	41
2.8.2	Disposición 2 (T1 – 2) (2 Varillas enterradas verticalmente dispuestas en línea).....	43
2.8.3	Disposición 3 (T1 – 3) (3 Varillas enterradas verticalmente dispuestas en línea).....	45
2.9	EQUIPO DE MEDICIÓN (TELUROMETRO)	47
2.10	ANÁLISIS DE SOFTWARES PARA EL CÁLCULO DE LA RESISTIVIDAD Y RESISTENCIA APARENTE DEL SUELO	47
2.10.1	RE2CAP	48
2.10.1.1	Procedimiento de utilización.....	49
2.10.2	IPI2WIN.....	51
2.10.2.1	Procedimiento de utilización.....	52

2.11	CÁLCULO DE LA RESISTENCIA APARENTE DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.....	55
2.11.1	ERICO GEM Calculator	55
2.11.1.1	Procedimiento de cálculo	56
2.11.2	CYPELEC Grounding IEC	56
2.11.2.1	Procedimiento de cálculo	56
2.12	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SOFTWARES PARA EL DISEÑO DE LA PUESTA A TIERRA.....	58
2.12.1	Cálculo de la resistividad del terreno	58
2.12.1.1	Software IPI2WIN	59
2.12.1.2	Software Re2cap	59
2.13	DETERMINACIÓN DEL SOFTWARE PARA EL DESARROLLO DE LA PROPUESTA	60
2.13.1	Estudio 1.- Toma de datos del suelo en el sector La Victoria. (Sector 1) ...	61
2.13.2	Estudio 2.- Toma de datos del suelo en el sector La Victoria. (Sector 2) ...	67
2.13.3	Estudio 3.- Toma de datos del suelo en el sector Vivienda Popular 1. (Sector 1).....	71
2.13.4	Estudio 4.- Toma de datos del suelo en el sector Vivienda Popular 1. (Sector 2).....	75
2.14	APLICACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO EN EL ÁMBITO TÉCNICO... ..	78
2.15	COMPARACIÓN DE RESULTADOS TEÓRICOS CON LAS MEDICIONES EN CAMPO	83
	CAPÍTULO III	85
3	DESARROLLO DE LA PROPUESTA.....	85
3.1	Composición estructural de la guía	85
3.1.1	TITULO	86
3.1.2	OBJETIVOS.....	86
3.1.3	ALCANCE	86
3.1.4	NORMATIVAS	86
3.1.5	TÉRMINOS Y DEFINICIONES.....	86
3.1.6	MATERIALES, EQUIPOS Y SISTEMAS.....	87
3.1.7	GENERALIDADES	87
3.1.8	FASES DEL PROCEDIMIENTO	87
3.1.8.1	Fase 1. Planificación y Preparación.....	88

3.1.8.2	Fase 2. Sondeo eléctrico en Campo	88
3.1.8.3	Fase 3. Interpretación de datos recolectados	88
3.1.9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
3.1.10	ANEXOS	88
	CONCLUSIONES:.....	89
	RECOMENDACIONES:.....	90
	BIBLIOGRAFÍA	91
	ANEXO	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Variación de la resistividad en función de la Estratigrafía del Terreno	6
Figura 2 Diagrama método de variación de profundidad o de tres puntas	8
Figura 3 Método Wenner de cuatro puntas.....	9
Figura 4 Arreglo convencional de cuatro electrodos para medir la resistividad del subsuelo .	9
Figura 5 Diferentes combinaciones del arreglo Wenner.....	10
Figura 6: Método de cuatro puntos (Schlumberger)	11
Figura 7 Modelo Biestratificado	15
Figura 8: Grafico de Shunde	17
Figura 9: Método de dos puntos mediante un equipo especializado	18
Figura 10: Medición de la resistencia por el método de tres puntos.	19
Figura 11: Medición de la resistencia de una puesta a tierra por método de caída de potencial.....	20
Figura 12: Sistema de puesta a tierra en neutro de una línea eléctrica aérea	22
Figura 13: Conductor de cobre desnudo. Sólidos y cableados.....	27
Figura 14:Jabalina en forma vertical considerando el modelo de dos capas	28
Figura 15: Jabalina en forma vertical considerando el modelo de tres capas	29
Figura 16: Suelo multicapa equivalente a dos capas	30
Figura 17: Instrucciones para la instalación de gel químico sobre conductor desnudo.....	38
Figura 18: Instalación de gel químico para puesta a tierra	39
Figura 19: Electrodo químico.....	40
Figura 20: Varilla dispuesta verticalmente	42
Figura 21: Disposición dos varillas verticales	43
Figura 22: Disposición 3 varillas verticales	45
Figura 23: Probador de resistencia de tierra	47
Figura 24: Interfaz del programa Re2cap	49
Figura 25: Ingreso de datos Re2cap	50
Figura 26: Curva de campo y resultados Re2cap.....	50
Figura 27: Interfaz IPI2WIN	52
Figura 28: Pantalla ingreso de datos.....	52
Figura 29: Curva de resistividad y campo	53
Figura 30: Menú para nueva modelación.....	53
Figura 31: Ajustes del nuevo modelo determinado por el programa.....	54
Figura 32: Parámetros de inversión y elección de numero de capas	54
Figura 33: interfaz del programa ERICO.....	55

Figura 34: Interfaz de programa CYPELEC Grounding IEC.....	57
Figura 35: Resistividad del terreno ingreso de datos.....	57
Figura 36: combinación de electrodos con conductor enterrado horizontalmente.....	58
Figura 37:Obtención de datos en campo método de Wenner caso de estudio 1	62
Figura 38:Datos ingresados caso de estudio 1	63
Figura 39:Datos ingresados caso de estudio 1	63
Figura 40:Modelación del Suelo caso de estudio 1 con el IPI2WIN.....	64
Figura 41:Nuevo modelo determinado por el programa caso de estudio 1	64
Figura 42:Cálculo teórico de la resistencia aparente del suelo caso de estudio 1	66
Figura 43:Resistencia de varilla instalada caso estudio 1	66
Figura 44:Obtención de datos en campo caso de estudio 2	67
Figura 45:Datos ingresados caso de estudio 2.....	68
Figura 46:Modelación del Suelo caso 2 con el IPI2WIN.....	68
Figura 47:Nuevo modelo determinado por el programa estudio 2	69
Figura 48:Cálculo teórico de la resistencia aparente del suelo caso de estudio	70
Figura 49:Resistencia de varilla instalada caso estudio 2	70
Figura 50: Obtención de datos en campo método de Wenner caso de estudio 3	71
Figura 51:Datos ingresados caso de estudio 3.....	72
Figura 52:Modelación del Suelo caso 3 con el IPI2WIN.....	72
Figura 53:Nuevo modelo en dos capas determinado por el programa caso de estudio 3.....	73
Figura 54:Cálculo teórico de la resistencia aparente del suelo caso de estudio 3	74
Figura 55:Resistencia de varilla instalada caso estudio 3	74
Figura 56:Obtención de datos en campo método de Wenner caso de estudio 4	75
Figura 57:Modelación del Suelo caso 4 con el IPI2WIN.....	76
Figura 58:Nuevo modelo en dos capas determinado por el programa caso de estudio 4.....	76
Figura 59:Cálculo teórico de la resistencia aparente del suelo caso de estudio 4	77
Figura 60:Resistencia de varilla instalada caso estudio 3	78
Figura 61:Ubicación proyecto eléctrico	78
Figura 62: Obtención de datos en campo proyecto eléctrico	79
Figura 63:Nuevo modelo en dos capas proyecto eléctrico	80
Figura 64:Cálculo teórico de la resistencia aparente proyecto eléctrico para una varilla instalada.....	81
Figura 65:Resistencia de una varilla instalada.....	82
Figura 66:Cálculo teórico de la resistencia aparente proyecto eléctrico para dos varillas en línea.....	82
Figura 67:Resistencia de disposición dos varillas instaladas en línea	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resistividad de varios suelos	3
Tabla 2 Variación de la resistividad según diferentes factores	6
Tabla 3: Tabla Constantes de materiales	25
Tabla 4: Calibre recomendado para los sistemas de puesta a tierra para transformadores de distribución monofásicos.	26
Tabla 5: Calibre recomendado para los sistemas de puesta a tierra para transformadores de distribución trifásicos.	27
Tabla 6: Valores recomendados de resistencia de puesta a tierra	31
Tabla 7: Valores de resistencia de puesta a tierra variando la longitud de la varilla.	35
Tabla 8: Resumen de las resistividades máximas permitidas para las disposiciones de puestas a tierra	46
Tabla 9: Datos tabulados caso de estudio 1	62
Tabla 10: Datos tabulados caso de estudio 2	67
Tabla 11: Datos tabulados caso de estudio 3	71
Tabla 12: Datos tabulados caso de estudio 4	75
Tabla 13: Datos tabulados del proyecto eléctrico	79
Tabla 14: Comparación de Resistencia de puesta a tierra teórica y medida	84

RESUMEN

Un sistema de puesta a tierra es el conjunto de elementos comprendidos de varillas y conductor de cobre, estos se encuentran unidos entre sí mediante conectores o suelda exotérmica hacia los equipos, estructuras metálicas o instalaciones eléctricas, ayuda a evitar que se saturen de corrientes no deseadas, disminuye el riesgo de deterioro prematuro por causa del aumento de voltaje, desvía cargas electroestáticas hacia los electrodos enterrados en el suelo sin causar daños a personas y equipos. No obstante, en la actualidad existen algunas normativas nacionales donde se especifica la correcta instalación y diseño de un sistema de puesta a tierra, pero en la práctica, no se acostumbra la utilización de estas normas debido a la creencia de que un sistema de puesta a tierra para transformadores de distribución es sencillo de instalar, generalmente, en los proyectos eléctricos la puesta a tierra no recibe importancia necesaria para su diseño, es por esta razón que se realizó esta investigación.

El presente proyecto de investigación tiene la finalidad de lograr el mejoramiento del diseño e instalación de los sistemas de puestas a tierra de los transformadores de distribución que se realizan en los proyectos eléctricos, mediante la elaboración de una guía con metodologías y procedimientos basados en las normas IEEE STD 80-2000, la IEC 60364-5-54 y el uso de un software computacional libre.

En esta investigación, se realiza el estudio para establecer los parámetros más importantes para el diseño de los sistemas de puesta a tierra, los cuales son la resistividad del terreno y la resistencia teórica del sistema, por ello, se investiga los diferentes métodos para determinar estos parámetros, se tomó como referencia normativas nacionales e internacionales.

Mediante la ayuda de un software computacional se realizaron varios casos de estudio, en los cuales se realizó sondeos eléctricos en varios sectores de la ciudad para validar la metodología de aplicar un software computacional, se realizó un cuadro comparativo de los valores teóricos obtenidos por software y medidos en campo.

Con la información obtenida, se elaboró una guía para el diseño de los sistemas de puesta a tierra de los transformadores de distribución, este recurso es de gran apoyo para realizar los diseños en proyectos eléctricos, debido a que se registran parámetros y normativas aplicables para la construcción de los sistemas de aterramiento.

Palabras clave: Sistema de puesta a tierra, normas, mejoramiento, software y guía.

ABSTRACT

Earthing system is the set of elements comprised of rods and copper conductor, connectors or exothermic welding to equipment, metal structures or electrical installations links these together. It's helps to prevent them from being saturated with unwanted currents, reduces the risk of premature deterioration due to the increase in voltage, diverts electrostatic charges towards the electrodes buried in the ground without causing damage to people and equipment. However, there are some national regulations that specify the correct installation and design of a grounding system, but in practice, these standards is not customary due to the belief that a grounding system Grounding for distribution transformers is easy to install. Generally, in electrical projects, grounding does not receive the necessary importance for its design, it is for this reason this research was do.

The purpose of this research project is to improve the design and installation of grounding systems for distribution transformers for electrical projects, through the development of a guide with methodologies and procedures based on standards. IEEE STD 80-2000, IEC 60364-5-54 and the use of free computer software.

In this research, the study is carried out to establish the most important parameters for the design of grounding systems, which are the resistivity of the ground and the theoretical resistance of the system, therefore, the different methods to determine these are investigated parameters, national and international regulations were taken as a reference.

Through the help of computer software, several case studies were carried out, in which electrical surveys were carried out in various sectors of the city to validate the methodology of applying computer software, a comparative table was made of the theoretical values obtained by software and measured in the field.

With the information obtained made a guide for design of the grounding systems of distribution transformers, this resource is of great support to carry out the designs in electrical projects, because applicable parameters and regulations registered for the construction of grounding systems.

Keywords: Grounding system, standards, improvement, software and guide.

INTRODUCCIÓN

1. TEMA O TÍTULO

Determinación de un modelo biestratificado a utilizarse en proyectos eléctricos para las puestas a tierra de transformadores de distribución y cámaras eléctricas mediante el uso de un software computacional.

2. EL PROBLEMA

Las empresas distribuidoras de energía eléctrica a nivel nacional emiten las normas para la construcción de redes eléctricas de distribución, entre ellas se encuentran los lineamientos para la instalación de los sistemas de puesta a tierra; actualmente en los proyectos eléctricos, el sistema de puesta a tierra en los transformadores de distribución, los profesionales del sector eléctrico la instalan siguiendo los lineamientos emitidos por las distribuidoras de energía, dichos lineamientos detallan que el proyectista debe seleccionar una de las disposiciones para la conexión a tierra, de acuerdo al valor de la resistividad del terreno, a fin de obtener un valor de resistencia de puesta a tierra de 25 ohmios para instalaciones aéreas y 5 ohmios para instalaciones subterráneas (EEQUITO, 2014).

En la práctica, luego de ejecutar al cien por ciento un proyecto eléctrico y seguir los lineamientos de instalación del sistema de puesta a tierra, el departamento de fiscalización de la empresa distribuidora evalúa el proyecto y como punto principal la resistencia del sistema de puesta a tierra, en consecuencia, existe la probabilidad de que no cumpla con los 5 y 25 ohmios de resistencia exigidos, debido a la naturaleza variante del terreno.

Un sistema de puesta a tierra mal calculado e instalado en los transformadores de distribución, está sometido a diferentes fenómenos producidos por el circuito en sí o por algún tipo de falla, como por ejemplo corrientes de fuga, sobre corrientes, cortocircuitos, descargas atmosféricas, entre otras, las cuales tienen que desfogarse por algún lado y si no se tiene una puesta a tierra correctamente diseñada esas corrientes no tendrán un camino por el cual fluir y direccionarse hacia la tierra, por lo tanto se regresaran al circuito, pueden dañar los equipos y tener consecuentes daños económicos.

En la actualidad, las empresas distribuidoras de energía eléctrica, no emite un documento aprobado para los proyectistas con procedimientos, metodologías y lineamientos para la

medición de la resistividad de los suelos mediante el uso de un software computacional libre, que sirva de guía para la instalación de los sistemas de puesta a tierra de los transformadores de distribución y cámaras eléctricas. Aun así, los profesionales desarrollan estos procedimientos por medio del conocimiento obtenido en el campo laboral u obtenido del auto aprendizaje, esto provoca una descentralización de conocimientos y que no exista un procedimiento o lineamientos para realizar la instalación de un sistema de puesta a tierra óptimo para transformadores de distribución y sirva de pauta para los nuevos profesionales que se integran en el campo de ejecución de proyectos eléctricos.

Los profesionales del sector eléctrico requieren un documento general de lineamientos para el mejoramiento de las instalaciones de los sistemas de puestas a tierra de sus proyectos eléctricos y con mayor importancia haciendo el uso de un software computacional, necesitan una guía que permita garantizar un diseño más eficaz del sistema de puesta a tierra y sea aprobado sin inconvenientes, además asegurar que el sistema no tenga una pérdida prematura de la capacidad de transportar corrientes peligrosas, no deje paso a caminos accidentales y no provoque desde fallas tempranas de los equipos hasta fatalidades humanas.

3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo elaborar una guía para los profesionales eléctricos que sirva de pauta para sus proyectos eléctricos en el diseño y medición de las puestas a tierra de los transformadores de distribución y cámaras eléctricas mediante el uso de un software computacional y se ajusten a parámetros normalizados?

4. OBJETIVOS

a) Objetivo General

Determinar un modelo biestratificado a utilizarse en proyectos eléctricos para las puestas a tierra que se diseñan en transformadores de distribución y cámaras eléctricas mediante el uso de un software computacional.

b) Objetivos Específicos

- Describir los distintos métodos de medición de suelos asociados al modelo biestratificado.

- Establecer el software necesario para el diseño de los sistemas de puestas a tierra de los transformadores de distribución y cámaras eléctricas.
- Elaborar una guía para el diseño de los sistemas de puesta a tierra de los transformadores de distribución y cámaras eléctricas partiendo del modelo biestratificado mediante el uso de un software computacional.

5. ALCANCE

El presente proyecto de investigación tiene la finalidad de lograr el mejoramiento de las instalaciones de los sistemas de puestas a tierra de los transformadores de distribución y cámaras eléctricas de los proyectos eléctricos, mediante la elaboración de una guía con lineamientos y procedimientos basados en las normas IEEE STD 80-2000 y la IEC 60364-5-54 para los profesionales del sector eléctrico y con mayor importancia haciendo uso de un software computacional libre para garantizar el diseño bien calculado de los sistemas de puesta a tierra, asegurar que el sistema de puesta a tierra no tenga una pérdida prematura de la capacidad de transportar corrientes peligrosas, no deje paso a caminos accidentales, no provoque fallas tempranas de los equipos, evite consecuentes daños económicos e impida fatalidades humanas.

6. LIMITACIONES

Para este proyecto de investigación las restricciones son principalmente del software, porque no se desarrollará un programa como tal. Sin embargo, se hará el uso de un software libre, para que, en base a él; se realice el diseño de las puestas a tierra para los transformadores de distribución y cámaras eléctricas.

7. JUSTIFICACIÓN – Detalle del Impacto (viabilidad)

El motivo de este plan de investigación sobre el modelo biestratificado de un sistema de puesta a tierra es que se promueva a realizar correctamente el diseño y cálculo de la instalación del sistema y no se trate de instalar un sistema de puesta a tierra directamente sin un previo análisis del terreno, este tema de estudio será esencial ya que se acoplará al diseño de las puestas a tierra de los proyectos eléctricos para los transformadores de distribución y cámaras eléctricas, el elaborar una guía con lineamientos y normativas para el diseño de las puestas a tierra ayudará a realizar una presentación más profesional y eficaz, será eficiente

para el trámite de fiscalización del proyecto eléctrico, debido a que se presentará por adelantado la proyección de la resistividad del suelo, dando a conocer la resistencia aparente del suelo y con ello se determinará si la resistencia se encuentra dentro los parámetros establecidos por la normas técnicas.

Actualmente las cámaras eléctricas subterráneas de transformación son muy empleadas debido a que la población tiende a extenderse y las zonas de construcción para redes aéreas son muy limitadas, por ello, una cámara eléctrica debe poseer un sistema de puesta a tierra correctamente instalada mediante un previo análisis, por consiguiente, el presente proyecto se acoplará también al proceso de construcción dichas cámaras.

Entre los métodos más utilizados para determinar la resistividad del terreno está el modelo de una capa, debido a que, es más fácil de analizar las mediciones de resistividad; sin embargo, cualquier terreno por muy uniforme que parezca siempre se encuentra en varias capas y cada una tiene una resistividad diferente. Por esa razón el uso del modelo biestratificado representa una manera más exacta las condiciones del terreno, esto permitirá un diseño más seguro y obtener valores adecuados de resistividad.

La finalidad de determinar un modelo biestratificado mediante el uso de un software computacional, basados en las normas IEEE STD 80-2000 y la IEC 60364-5-54 garantizan la implementación y cumplimiento de la normativa de los sistemas de puesta a tierra, además aportará una buena práctica en el cálculo y diseño de un sistema de puesta a tierra para transformadores de distribución y cámaras eléctricas.

8. CONTEXTO

En el Ecuador, las empresas distribuidoras de energía eléctrica emiten las normas para la construcción de redes eléctricas de distribución, entre ellas detallan los procedimientos para la instalación de los sistemas de puesta a tierra para equipos e instalaciones eléctricas, los procedimientos detallan que el proyectista debe seleccionar una de las disposiciones para la conexión a tierra, de acuerdo al valor de la resistividad del terreno, a fin de obtener un valor de resistencia de puesta a tierra a 25 ohmios para instalaciones aéreas y 5 ohmios para instalaciones subterráneas (EEQUITO, Normas para sistemas de distribución parate A, 2014).

En la actualidad, las empresas distribuidoras de energía eléctrica no emiten un documento aprobado para los proyectistas con procedimientos, metodologías y lineamientos, para la

medición de la resistividad de los suelos mediante el uso de un software computacional libre, que sirva de guía para el diseño de puestas a tierra para los transformadores de distribución y cámaras eléctricas. Es una desventaja debido a que tienen que buscar por sus propios medios la información para el diseño de puestas a tierra, esto lleva a que realicen a su percepción el diseño y en consecuencia instalen una puesta a tierra mal diseñada y mal calculada. Según normativas internacionales como la STD 80 (IEEE, 2000) y (IEEE, 2015) mencionan que, toda instalación eléctrica sin excepción debe poseer un sistema de puesta a tierra incorporado. Un sistema de puesta a tierra cumple un rol muy importante dentro de una instalación, principalmente proporcionar seguridad adecuada para las personas, los equipos y la instalación misma cuando se producen fallas o descargas eléctricas.

Según Arias Velásquez, RM y Mejía Lara, JV, 2019 en su artículo mencionan que, el sistema de puesta a tierra en un sistema eléctrico puede desempeñar diferentes funciones en sistemas eléctricos. Cuando uno de los parámetros del sistema de puesta a tierra varía el sistema no cumple con los objetivos deseados. En consecuencia, las matrices y las dimensiones de los electrodos necesarios para realizar una puesta a tierra, también varían, en este caso con fuerte influencia del suelo donde se ubican los electrodos, especialmente la resistividad eléctrica del suelo. Dependiendo del tipo de aplicación, los parámetros de puesta a tierra también varían.

Estos sistemas deben cumplir con dos objetivos principales bajo condiciones normales y de falla; el primer objetivo es asegurar que las personas no estén expuestas al peligro de las corrientes eléctricas de choque; el segundo es proporcionar los medios para disipar corrientes eléctricas a tierra sin exceder los límites de operación de la red y de los equipos (BERROSPI, 2013).

Los sistemas de puesta a tierra se utilizan en diferentes aplicaciones que van desde una simple instalación eléctrica domiciliaria, hasta grandes sistemas de aterramiento para sistemas de transmisión, generación o distribución de la energía eléctrica. En la actualidad hay un sin número de proyectos eléctricos diseñados por técnicos y departamentos de ingeniería eléctrica, los cuales, en ocasiones no cumplen con los requerimientos técnicos sobre las puestas a tierra y de seguridad exigidos en la norma STD 80 (IEEE, 2000), lo que tiene como consecuencia errores en el dimensionamiento de los elementos del sistema de puesta a tierra.

El factor principal para el diseño de una puesta a tierra es la resistividad del suelo, la misma que se obtendrá mediante mediciones que se realizarán en el terreno donde se implementará

el sistema de puesta a tierra. El presente trabajo pretende determinar un modelo en dos capas para la medición de la resistividad del suelo y utilizarla para diseño de las puestas a tierra de los transformadores de distribución y cámaras eléctricas que se realizan en los diferentes proyectos eléctricos haciendo uso de un software computacional.

Las TIC se desarrollan a partir de los avances científicos producidos en los ámbitos de la informática y las telecomunicaciones. Las TIC son el conjunto de tecnologías que permiten el acceso, producción, tratamiento y comunicación de información presentada en diferentes códigos (texto, imagen, sonido, entre otros). El elemento más representativo de las nuevas tecnologías es sin duda el ordenador y más específicamente, Internet. Como indican diferentes autores, Internet supone un salto cualitativo de gran magnitud, cambiando y redefiniendo los modos de conocer y relacionarse del hombre (Consuelo, 2021).

Las aplicaciones o programas que podemos utilizar con el ordenador en algunos casos no requieren el uso de las redes de comunicación, sino que están diseñados para su uso de forma local -off line-. Estas aplicaciones informáticas están bastante extendidas, siendo las más utilizadas por los usuarios principalmente las aplicaciones ofimáticas (procesador de texto, hoja de cálculo, gestor de bases de datos, etc.), que se adaptan a las necesidades de usuarios de diferentes ámbitos y profesiones. No obstante, podemos encontrar otras aplicaciones que son utilizadas en ámbitos más específicos o concretos (ej. aplicaciones estadísticas, contabilidad, gestión, entre otras). (Consuelo, 2021)

CAPÍTULO I

Marco teórico

El capítulo uno presenta los conceptos referentes a los sistemas de puestas a tierra. Se define los componentes que forman parte del sistema, se explica los distintos métodos de medición de suelos asociados al modelo biestratificado y conceptos para el diseño de puestas a tierra.

Para el diseño de puestas a tierra existen normativas que determinan los métodos y límites para diseño un sistema de aterramiento y se debe satisfacer su cumplimiento. El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), es una sociedad internacional de profesionales que estandariza métodos de dimensionamiento como el de un sistema de puesta a tierra. La norma internacional estándar IEC 60364, también emite lineamientos que servirán para el desarrollo de la presente investigación.

Se tomará como referencia las siguientes normativas:

- IEEE STD 80 2000/2013 - Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- IEEE STD 81 1983 - Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System.
- IEC 60364-5-54 - International standard. Selection and erection of electrical equipment – Earthing arrangements, protective conductors and protective bonding conductors.

1.1. Puesta a tierra

En la ejecución de un proyecto eléctrico, una puesta a tierra, es la instalación mediante conductor y varillas de cobre enterrados en el suelo, estos elementos se unen mediante conectores o se funden mediante suelta exotérmica y se conectan con los elementos conductores de los equipos o sistemas eléctricos. (Manani, 2013), indica que: “Un sistema puesta a tierra comprende toda la ligazón metálica directa sin fusible ni protección alguna, de sección suficiente entre determinados elementos o partes de una instalación y un grupo de electrodos, enterrados en el suelo.”

Otra definición para un sistema de puesta a tierra es la conexión intencional a tierra de los elementos conductores de un dispositivo o de un sistema eléctrico conectados entre sí mediante un circuito eléctrico comprendido de un conductor y varillas de cobre.

1.2. Objetivo de las puestas a tierra

Los objetivos de una puesta a tierra según (Espinosa, 2014) son:

- Garantizar la seguridad y protección de las personas.
- Proteger los equipos y las instalaciones.
- Garantizar un camino rápido a las corrientes de defecto sin exceder los límites de operación de la red eléctrica.
- Proteger de perturbaciones eléctricas al sistema como descargas atmosféricas, fallas trifásicas asimétricas, transitorios y sobreintensidades de valor elevado (corrientes de falla o defecto)

Es decir, el objetivo un sistema de puesta a tierra ayuda a evitar que los equipos se saturen de corrientes no deseadas, disminuye el riesgo de deterioro prematuro de los equipos y de los diferentes elementos eléctricos por causa del aumento de voltaje, desvía cargas electrostáticas o cargas atmosféricas a tierra hacia los electrodos enterrados en el suelo sin causar daños a personas y equipos.

1.3. Clasificación de los suelos

El suelo, ya sea como medio ambiente, materia prima u objeto de estudio, se caracteriza por un alto grado de complejidad debido a la interacción de fases sólida, líquida y gaseosa de diferente naturaleza, lo que dificulta predecir su comportamiento (Manuel, J., Azcárate J., Brendan C. & Kelly,, 2021). Por lo tanto, una definición corta y apropiada puede ser la de (Prakash, K., & Sridharan, A., 2012), que señalan que “ una clasificación de suelos es un método sistemático de categorizar los suelos en varios grupos y subgrupos de acuerdo con su probable comportamiento de ingeniería pero sin una descripción detallada ”.

Es de importancia explicar que un suelo no tiene una composición homogénea, en general se suele modelar su composición por capas compuestas aproximadamente por los mismos materiales. La variedad de esta composición es muy grande, y corresponde a una clasificación de suelos mucho más exhaustiva, la descripción detallada de estas capas. (Acuña, J., Iglesias, M., Jara, J., 2011)

Los dos componentes principales del suelo en general son el óxido de silicio y el óxido de aluminio los cuales excelentes aislantes eléctricos; no obstante, normalmente es posible

detectar una conducción eléctrica apreciable en el terreno debido a dos factores clave: la presencia de humedad y sales dejados por las formaciones rocosas o masas minerales y el volumen considerable que es sometido al campo eléctrico que facilita el flujo de cargas. (Acuña, J., Iglesias, M., Jara, J., 2011)

Es así como, la conducción en los suelos, de carácter electroquímico, depende de factores como:

- La porosidad de materiales componentes del terreno
- La distribución y disposición de los poros
- La conductividad de la solución acuosa que llena los poros, considerando aquí la conductividad primaria (propia del agua) y la secundaria (agregada por el suelo).

De este modo, considerando el tipo de agua que llena los poros del material que compone el terreno y la resistividad del agua, es posible una clasificación estimativa de los terrenos de acuerdo a su resistividad según se muestra en la tabla 1:

Tabla 1 Resistividad de varios suelos

NATURALEZA DEL TERRENO	RESISTIVIDAD EN OHM/M
Terrenos Pantanosos	+/-3 a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba Húmeda	5 a 100
Arcilla Plástica	50
Magras y Arcillas compactas	100 a 200
Margas del Jurásico	30 a 40
Arenas Arcillosas	50 a 500
Arena Sílice	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 5000
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Roca de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedente de alteración	1500 a 10000
Granito y gres muy alterado	100 a 600

Fuente: (LA RESISTIVIDAD DEL SUELO EN FUNCION DE LA FRECUENCIA, 2010)

1.3.1. Factores que influyen en la resistividad del suelo

Para definir el modelo biestratificado de terreno debemos considerar los factores que influyen en la resistividad del terreno, en la práctica, un terreno no es homogéneo por lo tanto, (Gómez, 2008) indica que, los factores que influyen en la resistividad del terreno son muchos entre ellos: estratigrafía, compactación, humedad, temperatura, entre otros. Dicho esto, deducimos que la resistividad de un terreno es variable, depende tanto de las características propias del terreno y factores ambientales como los cambios climáticos de la atmosfera.

A continuación, se detallan los factores principales que influyen sobre la resistividad del suelo:

- a) Influencia de la humedad y temperatura
- b) Influencia de compactación del suelo
- c) Composición del terreno y Sales solubles
- d) Granulometría
- e) Estratigrafía

a. Influencia de la humedad y temperatura. - También influye en la resistividad el grado de humedad de terreno: al aumentar la humedad (siempre que se añada agua a un terreno) disminuye la resistividad. Es por ello que procuramos tener terrenos húmedos para conseguir mejores valores. La resistividad del terreno varía con la temperatura, especialmente con las bajas temperaturas. (Ikastaroak, 2021). La resistividad aumenta cuando disminuye la temperatura y este empeoramiento se acusa mucho más cuando la temperatura cae por debajo de los 0°C, ya que el agua contenida en el terreno se congela y esto empeora muchísimo su resistividad. En las zonas con clima continental (veranos calurosos e inviernos fríos), los electrodos de tierra deben situarse a mayor profundidad, para evitar al máximo el riesgo ocasionado por las temperaturas inferiores a 0°C. (Ikastaroak, 2021)

b. Influencia de compactación del suelo. - Una mayor compactación del suelo disminuye la distancia entre las partículas y se logra una mejor conducción a través de la humedad contenida. A medida que se aumenta el contenido de humedad, se alcanza una especie de saturación ya que el agua envuelve la mayoría de las partículas y un mayor

acercamiento entre éstas no influye en la conducción (Acuña, J., Iglesias, M., Jara, J., 2011).

- c. Composición del terreno y Sales solubles.** - El agua destilada es aislante, pero si añadimos sales se convierte en un excelente conductor. Las sales tienen mucha influencia sobre el terreno, de tal forma que uno de los sistemas más utilizados para mejorar la resistividad del terreno es añadir sal en las arquetas de los puntos de puesta a tierra o cerca de los electrodos si son accesibles, y luego regarlo. Este recurso de añadir sal o geles para mejorar la resistividad del terreno no debe utilizarse de forma generalizada, sólo en las ocasiones que sea prácticamente imprescindible, ya que si construimos una tierra artificial luego debemos mantenerla a lo largo del tiempo (Ikastaroak, 2021).

- d. Granulometría.** - Influye bastante sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad y sobre la calidad del contacto con los electrodos aumentando la resistividad con el mayor tamaño de los granos de la tierra. Por esta razón la resistividad de la grava es superior a la de la arena y de que ésta sea mayor que la de la arcilla (Acuña, J., Iglesias, M., Jara, J., 2011).

- e. Estratigrafía.** - Los electrodos se introducen en el terreno a diferente profundidad. En algunas ocasiones, cuando las picas se introducen a mucha profundidad, atraviesan diferentes capas del terreno de distinta naturaleza, por tanto, diferente tienen resistividad un ejemplo se puede observar en la figura 1. La resistividad medida por el Telurómetro (medidor de tierras) será el valor medio que depende de las diferentes capas y del espesor de las mismas. En cualquier caso, siempre tendremos incertidumbre porque no conocemos el terreno más profundo, pero se recomienda la instalación de los electrodos en profundidad siempre que las instalaciones y el terreno lo permitan (Ikastaroak, 2021).

La variación de la resistividad del terreno según tres de estos factores se puede ver en la tabla 2:

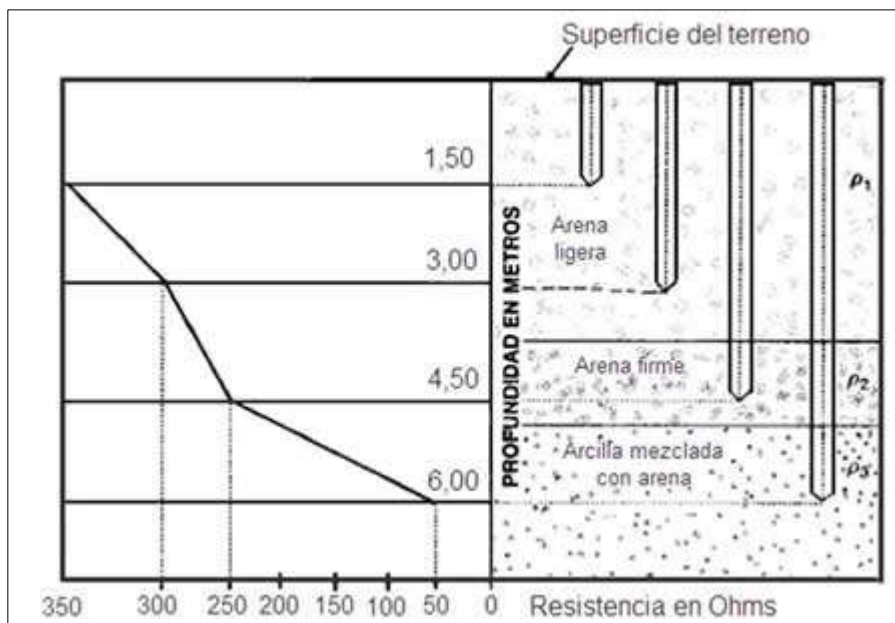
Tabla 2 Variación de la resistividad según diferentes factores

Variación de la resistividad con la temperatura						
Terreno arcillo - arenoso con 15% de humedad						
C	20	10	0(AGUA)	0(HIELO)	-5	-15
p . Cm	75	100	138	300	790	3300
Variación de la resistividad con la humedad						
Terreno arcillo-arenoso a 10 C						
%Agua	2,5	5	10	15	20	30
p . Cm	1500	450	185	105	63	42
Variación de la resistividad con contenido de sales						
Terreno arcillo-arenoso con 15% de humedad a 10 C						
%Sales	0	0,1	1	5	10	20
p . Cm	107	28	4,6	1,9	1,3	1

Fuente: (Medida de Resistividad de la resistividad del terreno, 2011)

La figura 1 muestra diversas capas que constituye un suelo no homogéneo, según el número de capas que forme el terreno, la resistividad varía de manera significativa. En la figura se puede observar diferentes resistividades ρ_1 , ρ_2 y ρ_3 . En el primer estrato ρ_1 se observa que un terreno compuesto por arena ligera, el segundo estrato ρ_2 se compone por arena firme y el ρ_3 presenta una mezcla de arcilla con arena. En la figura se evidencia que a mayor profundidad la resistencia disminuye debido a los diferentes tipos de terreno y a la compactación del suelo.

Figura 1 Variación de la resistividad en función de la Estratigrafía del Terreno



Fuente: (Factores que influyen en la resistividad, 2021)

1.3.2. Resistividad del suelo o terreno

La resistividad del terreno es fundamental en el estudio de una puesta a tierra debido a que es el factor más importante para la conducción de las corrientes no deseadas hacia tierra, no es recomendable estimar la resistividad del terreno basándose en la clasificación del terreno debido a que éstas dan solamente una aproximación de la resistividad (Tabla 1), la manera más confiable y exacta de saber el valor de la resistividad del suelo es realizar la toma medidas directas en campo.

En la norma técnica RA6014 (EPM, 2008) menciona que la resistividad representa la resistencia específica del suelo a cierta profundidad, o de un estrato del suelo se obtiene indirectamente al procesar un grupo de medidas de campo y su magnitud se expresa en (Ωm) o (Ωcm). Numéricamente es la resistencia ofrecida por un cubo de 1m x 1m x 1m, medida entre dos caras opuestas.

1.3.3. Técnicas para la medición de la resistividad del terreno

Dentro de las técnicas de medición para determinar la resistividad de los suelos establecidas por la norma IEEE Std 80 tenemos las siguientes:

- Método de variación de profundidad (Método de Tres puntos)
- Método de cuatro puntos (Wenner y Schlumberger)

1.3.3.1. Método de variación de profundidad

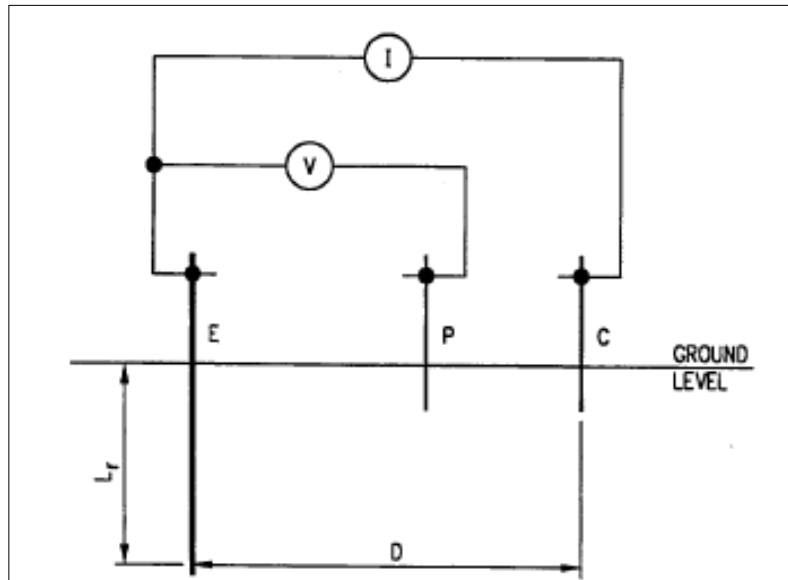
Es un procedimiento que se lleva a cabo varias veces, es decir se realiza varias mediciones de resistencia cada vez que se entierra la varilla.

Este método, a veces llamado método de tres puntos, es una prueba de resistencia a tierra que se lleva a cabo varias veces, cada vez la profundidad de enterramiento del electrodo probado aumenta en un incremento dado (IEEE, 2015). En la Figura 2, se muestra el circuito de conexión del método mencionado donde se varía la profundidad de L_r de la varilla E. Las dos picas auxiliares (P y C), se colocan en línea recta a poca profundidad

El procedimiento comúnmente aplicado es el de disponer una varilla metálica con marcaciones cada 20 o 30 cm, y cuya longitud debe ser la suficiente como para obtener la mayor información posible de las variaciones de la resistencia leída a medida que penetra la

varilla en la tierra (lo que originó el nombre de Método de la Variación de Profundidad), es decir por cada marca se lee un valor de resistencia y con la fórmula anterior se calcula la resistividad. (EPM, 2008)

Figura 2 Diagrama método de variación de profundidad o de tres puntas



Fuente: (IEEE, 2015)

Esta técnica de medición solo debe aplicarse cuando no se disponga del espacio suficiente para utilizar el método de cuatro puntos, pues el sondeo es mucho menor y no garantiza mediciones exactas en este método se considera que el terreno es homogéneo.

1.3.3.2. Método de cuatro puntos

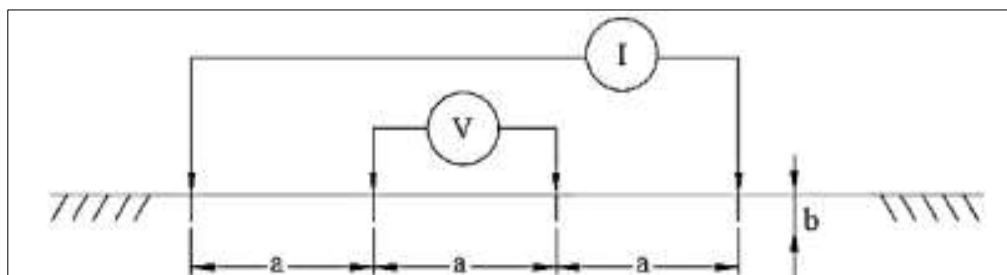
La norma (IEEE, 2015) indica que el método más exacto en la práctica de la medición de la resistividad media de grandes volúmenes de tierra sin perturbaciones es el método de cuatro puntos. Electrodo pequeños están enterrados en cuatro pequeños agujeros en la tierra, todos a la profundidad b y espaciados (en línea recta) a intervalos a . Una corriente de prueba I se pasa entre los dos electrodos exteriores y el V de potencial entre los dos electrodos interiores se mide con un potenciómetro o un voltímetro de alta impedancia. Entonces V/I da la resistencia R en ohmios. En la medición de la resistividad de terreno por el método de cuatro puntos descritos en la normativa tenemos:

- Método de Wenner
- Método de Schlumberger

1.3.3.2.1. Método de Wenner

El método Wenner de cuatro puntas, como se muestra en la Figura 2, es la técnica más utilizada. En resumen, cuatro puntas se entierran en la tierra a lo largo de una línea recta, a distancias iguales, a una profundidad b . La tensión entre los dos electrodos interiores (potencial) medida se divide entre la corriente entre los dos electrodos exteriores (corriente) para dar un valor de la resistencia R (IEEE, 2000). El método de cuatro electrodos o cuadripolo tipo Wenner es el método más preciso y popular. Por estas razones, este método obtiene la resistividad del suelo para capas profundas sin enterrar los electrodos a dichas profundidades, no es necesario un equipo pesado para realizar las medidas, los resultados no son afectados por la resistencia de los electrodos auxiliares o los huecos creados para hincarlos en el terreno. (GEOSEISMIC, 2017)

Figura 3 Método Wenner de cuatro puntas

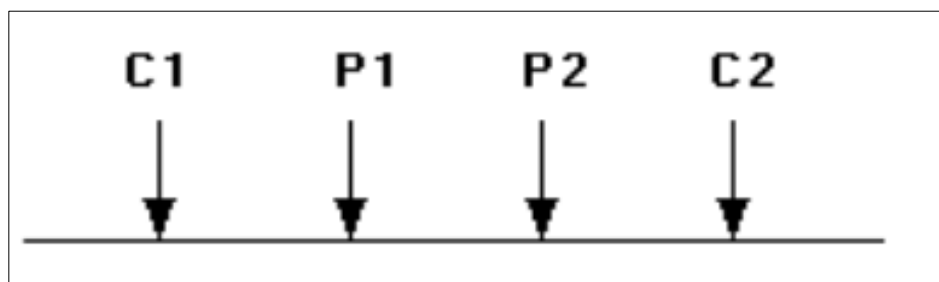


Fuente: (IEEE, 2012)

1.3.3.2.1.1. Arreglos del método de Wenner

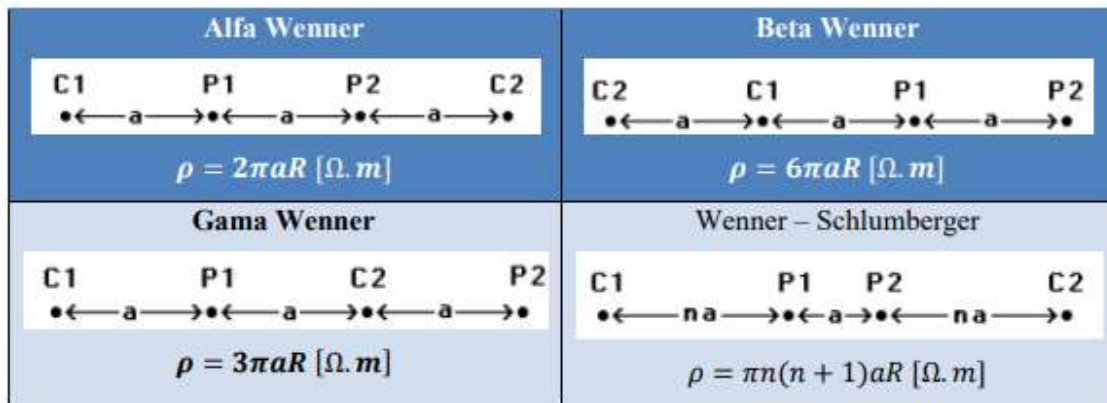
En la figura 4, se muestra el arreglo tradicional de las cuatro puntas para el método de Wenner, (LOKE, 1999) indica que, el arreglo Wenner tiene diferentes combinaciones las cuales se presentan en la figura 5:

Figura 4 Arreglo convencional de cuatro electrodos para medir la resistividad del subsuelo



Fuente: (A practical guide to 2-D and 3-D surveys , 1999)

Figura 5 Diferentes combinaciones del arreglo Wenner.



Fuente: (Perez, W., Serrano, C. & Surio, O., 2015)

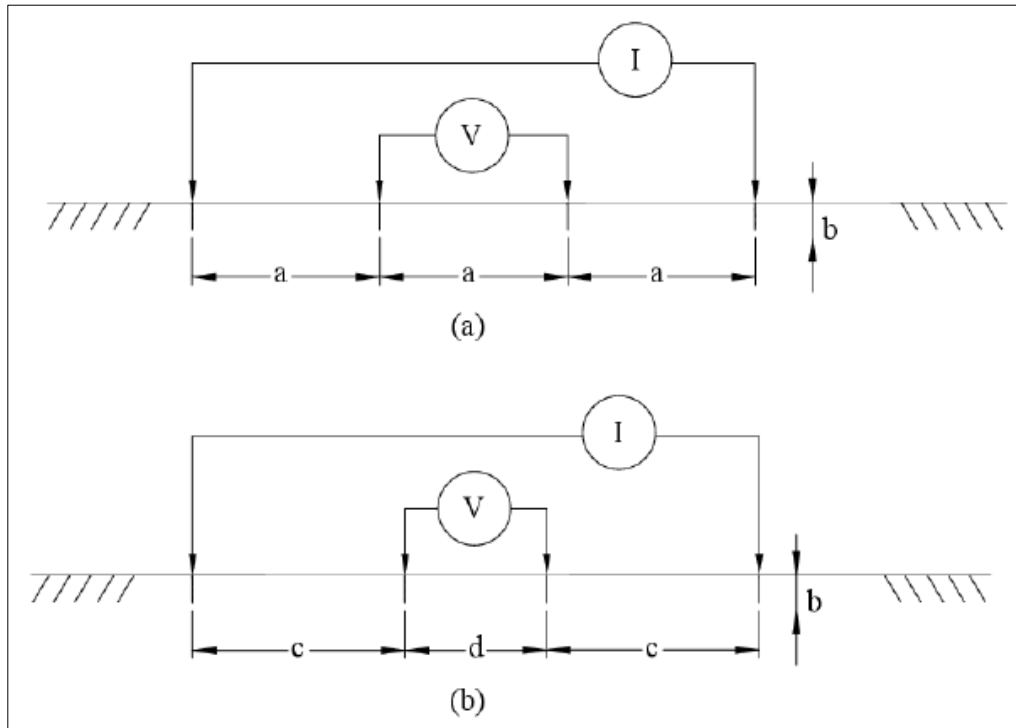
La combinación C1 P1 P2 C2, es la más frecuente utilizada para realizar las mediciones para determinar la resistividad aparente del terreno, la configuración más utilizada se muestra en la figura 4. Esta configuración de los electrodos permite una visualización más rápida de la curva, ya que la resistividad es obtenida directamente a partir de los valores de resistencia R tomados por el dispositivo de medición (Telurometro).

1.3.3.2.2. Método de Schlumberger

El Método Schlumberger – Palmer es una versión modificada del método de Wenner. Este método proporciona una mayor sensibilidad para el espaciamiento de la sonda grande, como se describe en (IEEE, 2015). En este método, los electrodos de medición de diferencia de potencial, están separados por una longitud d [m]. Por otro lado, los electrodos de inyección de corriente están separados por una distancia c [m], con respecto a los electrodos de medición de diferencia de potencial. En consecuencia, los dos electrodos de corriente están separados por una distancia $2c+d$, como se muestra en la figura 6.

Figura 6: Método de cuatro puntos (Schlumberger)

a) Espaciamientos Iguales b) Espaciamientos Desiguales



Fuente: (IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System, 2012)

1.3.4. Ventajas y desventajas de los métodos de medición

Anteriormente se describieron los distintos métodos de medición de los suelos, (Perez, W., Serrano, C. & Surio, O., 2015), indican algunas ventajas y desventajas de utilizar estos métodos de medición de la resistividad de los suelos.

1.3.4.1. Método de variación de profundidad

Ventajas

- Este método de medición se realiza cuando no existe espacio suficiente para realizar la medición mediante el método de cuatro puntos. (Wenner y Schlumberger).
- La ventaja que presenta este método es establecer la profundidad hasta la cual puede ser enterrada una varilla de puesta a tierra.

Desventajas

- La información obtenida mediante este método es muy limitada y solo se obtiene mediciones de las capas más superficiales.
- La varilla de puesta a tierra o electrodo pierde contacto directo con la tierra debido a las vibraciones provocadas por los golpes al enterrarlo.

1.3.4.2. Método de cuatro puntos

Ventajas

- No es necesario introducir los electrodos demasiado para lograr mediciones de resistividad a mayor profundidad.
- Los resultados de las mediciones no son afectados por la resistencia que presentan los electrodos de prueba.

Desventajas

- En este método de medición de la resistividad del suelo, todos los arreglos (Wenner y el arreglo Schlumberger) presentan la desventaja que se necesita un espacio amplio para realizar las mediciones de resistividad a mayor profundidad ya que la separación de los electrodos va en aumento.

En el método de cuatro puntos es el arreglo más utilizado para la medición de la resistividad de los suelos. A continuación, se presenta una comparación entre el método de Wenner y el arreglo Schlumberger.

1.3.4.2.1. Ventajas del método de Wenner

- Los valores de resistencia tomados son más directos en términos de la resistencia aparente.
- Este método ayuda a determinar fácilmente mediante los datos obtenidos el desarrollo de un gráfico de campo.

- Los instrumentos pueden ser de menor sensibilidad que los empleados con la configuración de Schlumberger, ya que a medida que se separan los electrodos de corriente, también lo hacen los de potencial.

1.3.4.2.2. Ventajas del método de Schlumberger

- Este tipo de configuración es menos sensible a las variaciones laterales del terreno, debido a que los electrodos de potencial permanecen invariantes.
- En la realización de esta configuración de la medición se presentan menos obstáculos, ya que sólo se desplazan los electrodos de corriente.

1.3.5. Consideraciones antes de realizar las mediciones en campo

Para realizar las mediciones en campo y efectuar adecuadamente cualquiera de los métodos de medición de la resistividad de los suelos antes descritos, se debe considerar:

- Verificar que no existan obstáculos en el área de medición de terreno y verificar la ausencia de otros objetos como tuberías rocas, árboles, edificaciones y establecer un centro de medición dispuesta en forma lineal para realizar las mediciones sin problemas.
- Las mediciones se realizarán en la situación más desfavorable posible para la conexión a tierra de las picas por ejemplo en días en los que el terreno se presente seco. En cambio, dado el caso de que el terreno se encuentre muy seco, lo recomendable humedecer los electrodos, especialmente el electrodo de corriente, para obtener un buen contacto entre el electrodo auxiliar y el terreno.
- Se debe verificar que los diferentes instrumentos de medición del Teluometro se encuentren en perfectas condiciones
- En caso de que no se pueda realizar mediciones con longitudes grandes (Método de Schlumberger), entre el centro y el electrodo de corriente, se pueden realizar mediciones de hasta 20 metros, es recomendable recolectar tres lecturas, en al menos tres direcciones, para luego establecer un promedio de cada una de las lecturas.

1.4. Modelamiento del Suelo

La interpretación de la resistividad aparente obtenida en el campo es quizás la parte más difícil del programa de medición. El objetivo fundamental es obtener un modelo de suelo que sea una buena aproximación de la tierra real. La resistividad del suelo varía lateralmente y con respecto a la profundidad, en función de la estratificación del suelo (IEEE, 2015). Dicho esto, es necesario realizar una investigación del suelo para así determinar la composición general del suelo y su grado de homogeneidad. La parte más importante de las mediciones de la resistividad es obtener un modelo del suelo y hay que reconocer que el modelo de suelo es sólo una aproximación de las condiciones del suelo real y que la pareja perfecta es poco probable (IEEE, 2015). Los modelos más usados del suelo son:

- Modelo suelo homogéneo
- Modelo estratificado de suelo no homogéneo

1.4.1. Modelo suelo homogéneo

El modelo de suelo homogéneo debe usarse sólo cuando hay una variación moderada de la resistividad aparente. En condiciones de suelo homogéneo, que rara vez ocurren en la práctica, el modelo de suelo uniforme podrá ser razonablemente exacto. Si hay una gran variación de la resistividad aparente medida, el modelo de suelo uniforme es poco probable que produzcan resultados exactos. Un modelo de suelo uniforme puede ser usado en lugar del modelo de múltiples capas siempre que las herramientas de cálculo de dos capas o de múltiples capas no estén disponibles. Por desgracia, el límite superior obligado del error sobre todos los parámetros de conexión a tierra de referencia es difícil de estimar en general, pero cuando el contraste entre la capa de resistividades diferentes es moderado, con un valor promedio de resistividad se puede utilizar como una primera aproximación o para establecer el orden de las magnitudes. (IEEE, 2012)

La resistividad del suelo aproximada uniforme puede obtenerse mediante la adopción de una media aritmética de los datos de resistividad aparente medidos. Es difícil desarrollar un modelo de suelo uniforme cuando la resistividad de un suelo varía de manera significativa.

1.4.2. Modelo estratificado de suelo no homogéneo

El modelo estratificado de suelo no homogéneo se puede dividir en dos sub-modelos los cuales se mencionan a continuación:

- Modelo de dos capas o biestratificado
- Modelo multicapas

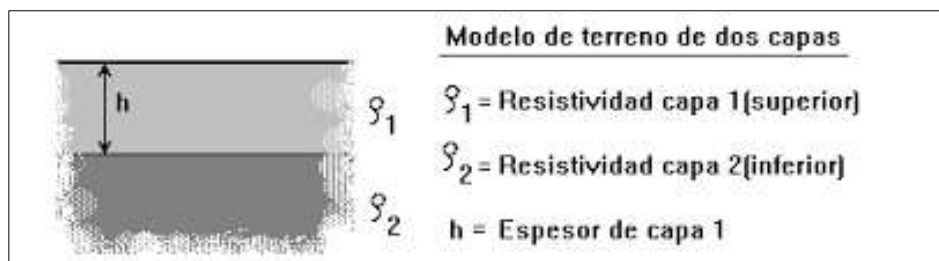
El modelo uniforme y el modelo de dos capas descritos anteriormente son los modelos de resistividad del suelo más utilizados, mientras que los modelo multicapa del suelo puede ser utilizado para las condiciones del suelo más complejas. La interpretación de las mediciones de resistividad del suelo se puede realizar de forma manual o mediante el uso de técnicas de análisis informático

1.4.2.1. Modelo de suelo de dos capas (Biestratificado)

Un modelo de dos capas de suelo puede ser representado por una capa superior de suelo de una profundidad finita por encima de una capa inferior de profundidad infinita como se muestra en la figura 7. El cambio brusco de la resistividad en los límites de cada capa de suelo se puede describir por medio de un factor de reflexión. En la figura se muestra ρ_1 que viene dada por la resistividad de la primera capa (capa superior), la ρ_2 es la resistividad en la segunda capa (capa inferior) y h es el espesor de la primera capa.

Mientras que la representación más exacta de un sistema de puesta a tierra sin duda debe ser basada en las variaciones reales de la resistividad del suelo actual en el sitio de la subestación, rara vez se justifica económicamente o es técnicamente viable modelar todas estas variaciones. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la representación de un electrodo a tierra basado en un modelo equivalente de tierra de dos capas es suficiente para el diseño de un sistema de puesta a tierra segura.

Figura 7 Modelo Biestratificado



Fuente: (MENDOZA, 2001)

La norma estándar IEEE 81-1983 proporciona métodos para la determinación las resistividades equivalentes de la capa superior e inferior de suelo y la altura de la capa superior de dicho modelo.

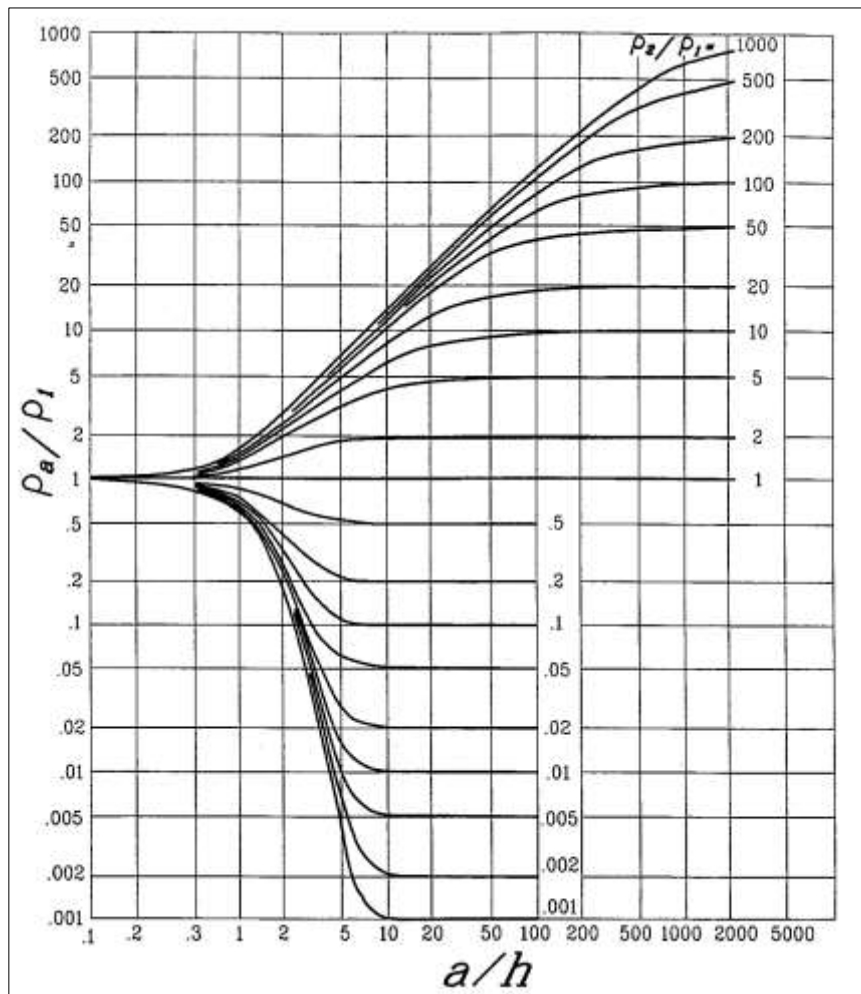
1.4.2.2. Modelo de suelo de dos capas por el método gráfico de Shunde

En el método Shunde, es un método sugerido en la norma IEEE-80 en donde, la gráfica que se muestra en la Figura 8, se utiliza para aproximar a un modelo de suelo de dos capas, que se basa en los datos de prueba del método Wenner. A partir de la curva de resistividad aparente obtenida de las mediciones, son seleccionados los parámetros ρ_1 y ρ_2 por inspección visual. La profundidad de la primera capa "h" se determina a través de gráficas formadas de resultados o experiencia acumulada.

Los parámetros ρ_1 y ρ_2 se obtienen mediante la inspección de las mediciones de resistividad. Sólo h se obtiene por el método gráfico de Shunde, de la siguiente manera:

- a) Trazar una curva de resistividad aparente p_a en el eje Y vs el espaciado de las puntas en el eje X.
- b) Estimación de ρ_1 y ρ_2 del gráfico de trazado en a). el p_a que corresponde a la distancia más pequeña es ρ_1 y para una separación más grande es ρ_2 . Amplíe el gráfico de resistividad aparente en ambos extremos para obtener estos valores de resistividad extremos si los datos de campo son insuficientes.
- c) Determinar ρ_2 / ρ_1 y seleccione una curva en el gráfico Shunde en la Figura 8, que coincida cerca, o interpole y dibuje una nueva curva en el gráfico.
- d) Seleccione el valor en el eje Y de p_a / ρ_1 dentro de la región con pendiente de la curva adecuada de ρ_2 / ρ_1
- e) Lea el valor correspondiente de a/h en el eje-x. de la figura 8.
- f) Calcule p_a multiplicando el valor seleccionado, p_a / ρ_1 , en (d) por ρ_1
- g) Lea la correspondiente separación de la sonda en la gráfica de resistividad aparente trazada en a).
- h) Calcule h, la profundidad del nivel superior, usando la adecuada separación de la sonda, a.

Figura 8: Grafico de Shunde



Fuente: (IEEE, 2015)

1.5. Malla a tierra.

Una malla de tierra es un conjunto de conductores interconectados entre sí y enterrados a cierta profundidad y que tiene por objetivo disipar al suelo magnitudes relativamente grandes de corriente eléctrica (normalmente corrientes de falla) asegurando que los voltajes en las cubiertas de las instalaciones protegidas por la malla de tierra y sobre el suelo mismo estén dentro de límites que no representen un riesgo a las personas (MENDOZA, 2001).

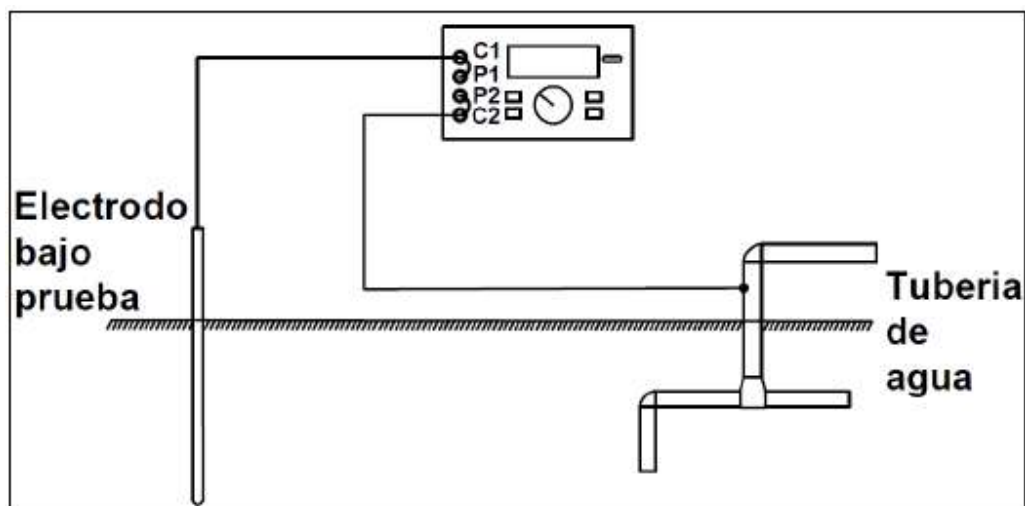
1.5.1. Métodos para la medición de la resistencia de una malla a tierra

La medición de la resistencia a tierra se realiza mediante toma de datos mediante equipos especializados como el Megger o Teluometro. En la norma IEEE Std 80 se mencionan los diferentes tipos de medición de la resistencia de puesta a tierra las cuales describiremos a continuación:

1.5.1.1. Método de dos puntos

En este método la resistencia del sistema de puesta a tierra es medida en serie con el electrodo auxiliar, la resistencia de este último es despreciable en comparación con la del sistema, usualmente este método se utiliza para realizar mediciones en una residencia, en donde el electrodo auxiliar puede ser las tuberías metálicas que suministran agua las cuales presentan una resistencia de alrededor de 1Ω y la resistencia de un sistema de puesta a tierra de una casa se presume debería de ser 25Ω que es mucho mayor que la resistencia del electrodo auxiliar. Este método se presta a muchos errores como por ejemplo si la tubería que funciona como electrodo auxiliar se acerca demasiado al sistema de puesta a tierra en estudio o si la resistencia del sistema está en el rango de la resistencia del electrodo auxiliar. (Perez, W., Serrano, C. & Surio, O., 2015). En la figura 9 se muestra el método de medición de dos puntos, la medición de la resistencia de puesta a tierra se realiza mediante un equipo especializado como el Telurometro.

Figura 9: Método de dos puntos mediante un equipo especializado

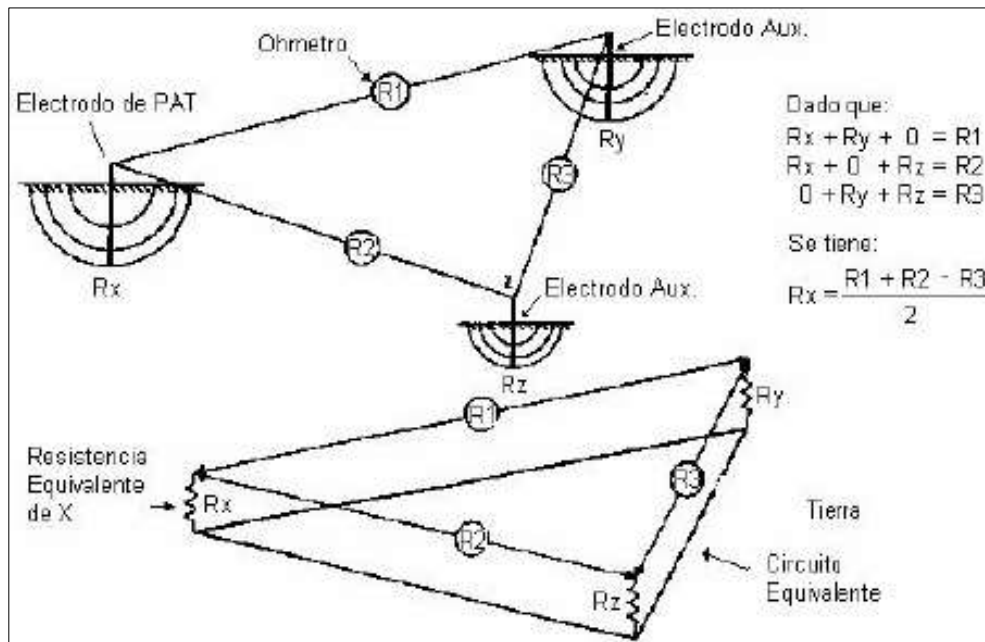


Fuente: (Manual de aplicación de la norma IEEE Std 81 para líneas y subestaciones eléctricas de transmisión., 2015)

1.5.1.2. Método de tres puntos

En este método se utilizan dos electrodos auxiliares con resistencias conocidas R_y y R_z respectivamente, que se pretende sean similares a la del electrodo o sistema en estudio. Estos dos electrodos se colocan formando un triángulo con el electrodo en estudio, luego con un equipo especializado se mide la resistencia entre cada uno de los electrodos como se muestra en la figura 10, no se inyecta corriente de prueba.

Figura 10: Medición de la resistencia por el método de tres puntos.



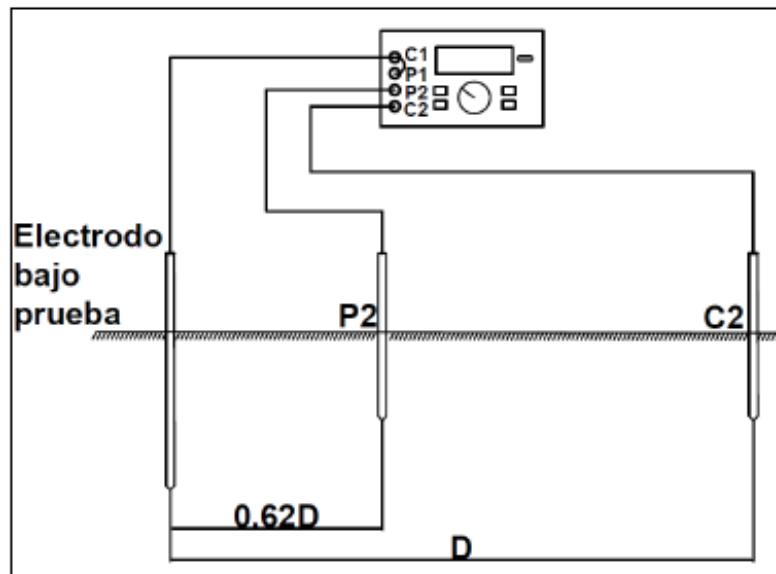
Fuente: (Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra., 2017)

Al realizar las operaciones necesarias para despejar R_x , obtenemos como resultado la resistencia del sistema de puesta a tierra. Se recomienda que la distancia entre electrodos sea de 8 metros o más para un electrodo simple para evitar superposición de gradientes de potencial (Perez, W., Serrano, C. & Surio, O., 2015). Este método es complicado de aplicar en sistemas de puesta a tierra grandes, se prefiere utilizar otros métodos sobre todo si se desea más precisión.

1.5.1.3. Método de caída de potencial o método del 62%

En este método se utilizan dos electrodos auxiliares conocidos como electrodo de corriente y electrodo de potencial que se colocan en una misma dirección. (Perez, W., Serrano, C. & Surio, O., 2015). El método consiste en inyectar una corriente constante entre el electrodo en estudio y el electrodo de corriente, seguidamente leer el valor de voltaje entre el electrodo en estudio y el electrodo de potencial, todo esto utilizando equipo como un voltímetro, un amperímetro y una fuente de corriente como se presenta en la figura 11.

Figura 11: Medición de la resistencia de una puesta a tierra por método de caída de potencial.



Fuente: (Manual de aplicación de la norma IEEE Std 81 para líneas y subestaciones eléctricas de transmisión., 2015)

La distancia D , debe de ser 5 veces la longitud más larga del sistema de puesta a tierra en estudio de la norma (IEEE, 2012) el electrodo de potencial debe de estar a una longitud que sea el 62% de la longitud entre el electrodo o sistema de puesta a tierra en estudio, esta distancia se basa en la posición teóricamente correcta para medir la exacta impedancia de los electrodos para un suelo con resistividad uniforme. Este método, al igual que el arreglo Wenner del método de cuatro puntos para la medición de resistividad del suelo, también se puede utilizar en suelos con cubiertas de pavimento, concreto o cemento (Perez, W., Serrano, C. & Surio, O., 2015).

En resumen, existen varias metodologías para la medición de la resistividad del terreno, las cuales, son recomendadas por normativas internacionales, el método más viable para la adquisición de datos en campo es el método de cuatro puntos (Wenner), debido a que los resultados son más precisos y más confiables a la hora de la interpretación de resultados, de la misma manera, para medir la resistencia de una puesta a tierra existen varios métodos para la obtener este valor, la adquisición de este valor, el proyectista o personal responsable determinara el método para la medición de la resistencia a tierra, pero se recomienda utilizar el método de tres puntos o el método de caída de potencial debido a que su procedimiento es más sencillo de aplicar y los resultados son confiables.

CAPITULO II

2. DESARROLLO

Para el desarrollo del capítulo dos se procede a recabar información para el cálculo y diseño de un sistema de puesta a tierra, se describirá el equipo para la medición de la resistividad del suelo, se analizará el software necesario para el diseño del sistema de puesta a tierra, se considerará las normas establecidas por la IEEE STD 80, IEC 60364-5-54, los lineamientos establecidos por las distribuidoras de energía y el NEC Ecuatoriano.

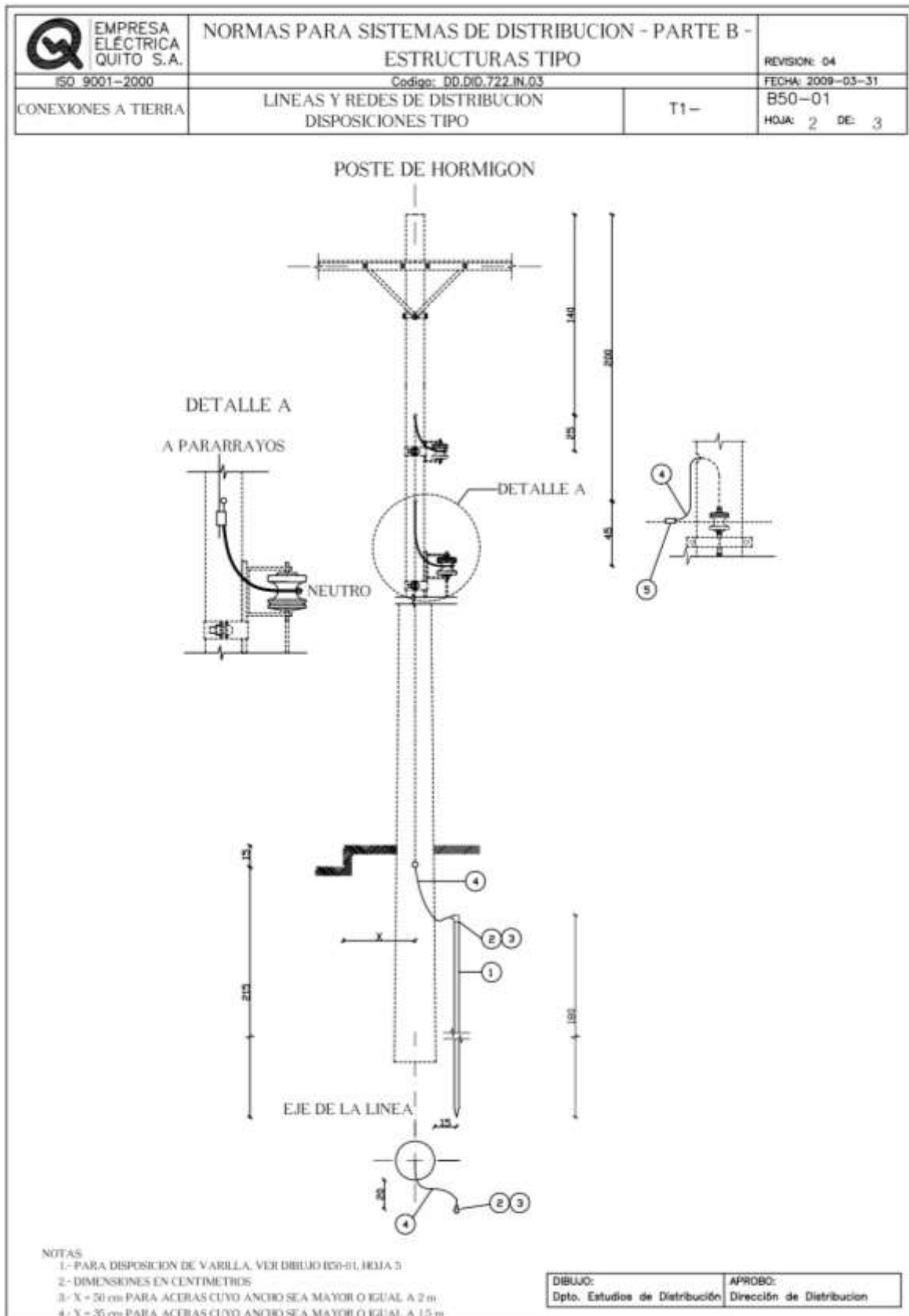
2.1 INSTALACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA PARA REDES ELÉCTRICAS, TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

Las empresas distribuidoras establecen las normativas para la instalación para las puestas a tierra, como por ejemplo en la empresa eléctrica Quito (EEQUITO, 2014), en su normativa establecen que las conexiones a tierra del neutro se efectuarán, por lo menos, en los siguientes puntos del sistema:

- a) Para redes de distribución en áreas urbanas: En los centros de transformación y en los dos terminales del circuito secundario más alejados del transformador.
- b) Para redes de distribución en áreas rurales: Similar al literal "a" y además para circuitos secundarios prolongados en puntos intermedios a intervalos de 200 m.
- c) Para circuitos primarios y líneas de distribución a 22,8 kv, con neutro continuo: a intervalos de aproximadamente 300 m en toda su longitud y además en los puntos terminales.

La figura 12 muestra al detalle la conexión de una varilla de puesta a tierra para líneas y redes de distribución tipo aérea, se observa que la varilla está instalada a 60 cm por debajo del límite de enterramiento del poste y se encuentra conectada mediante conductor de cobre número 2 hacia el neutro de la red aérea.

Figura 12: Sistema de puesta a tierra en neutro de una línea eléctrica aérea



Fuente: (Normas para sistemas de distribución parate A, 2014)

2.2 CÁLCULOS PARA EL DISEÑO DE PUESTAS A TIERRA DE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN PARA PROYECTOS ELÉCTRICOS

A continuación, se presenta una recolección de datos y fórmulas para el diseño e instalación de sistemas de puesta a tierra, estas fórmulas permitirán realizar los cálculos que se considera son los más importantes para diseñar un sistema de puesta a tierra para transformadores de distribución, los datos recopilados son aceptadas por normativas y reglamentos actuales.

2.3 CÁLCULO DEL CALIBRE DEL CONDUCTOR PARA TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

Para realizar el cálculo del calibre del conductor de puesta a tierra de un transformador de distribución tenemos que encontrar la corriente de cortocircuito. La corriente de cortocircuito para los transformadores de distribución está dada por la siguiente ecuación:

$$I_{cc} = \frac{I_n}{Z} \quad \text{Ec. 1}$$

Dónde:

I_{cc}: Corriente de cortocircuito (A).

I_n: Corriente nominal del Transformador (A)

Z: Impedancia del transformador (%).

La impedancia de los transformadores es establecida por los fabricantes, este valor se solicita al fabricante o en su efecto se revisa el protocolo de garantías para adquirir este valor, la impedancia de un transformador también la podemos encontrar en la placa de características que se encuentra al costado del equipo.

Ecuación para cálculo de la corriente I_n para transformador monofásico:

$$I_n = \frac{S}{V} \quad \text{Ec.2}$$

Ecuación para cálculo de la corriente I_n para transformador Trifásico:

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} * V} \quad \text{Ec.3}$$

Dónde:

S: Potencia nominal del transformador (KVA)

In: Corriente nominal del Transformador (A)

V: Voltaje del sistema en (V).

El cálculo de la corriente nominal se realiza con las formulas antes descritas o en su efecto las corrientes nominales se encuentran establecidas en el protocolo de garantías que emiten los fabricantes con la compra de un transformador.

Una vez que se determina la corriente de cortocircuito se procede a realizar el cálculo del calibre del conductor, este procedimiento se realiza mediante la fórmula establecida por la norma IEEE STD 80:

$$A_{kcmil} = I_{cc} * K_f * \sqrt{t_c} \quad \text{Ec. 4}$$

En unidades del sistema internacional mm^2 . Si $1Kcmil = 0.5067 mm^2$

$$A_{mm^2} = \frac{I_{cc} * K_f * \sqrt{t_c} * 0.5067}{1000} \quad \text{Ec. 5}$$

Dónde:

t_c : Es la duración de la corriente de falla en segundos.

K_f : Es la constante que tiene diferentes valores que dependen de (Temperatura de fusión o límite de temperatura del conductor) y usando la temperatura ambiente de 40°C.

La tabla 3 muestra las constantes de distintos materiales, que recomienda la norma IEEE-80 std-2000 para realizar el cálculo del calibre del conductor para los sistemas de puestas a tierra.

Tabla 3: Tabla Constantes de materiales

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD (%)	Tm (oC)	Kf
Cobre blando	100	1083	7
Cobre duro cuando se utiliza soldadura exotérmica	97	1084	7,06
Cobre duro cuando se utiliza conductor mecánico	97	250	11,78
Alambre de acero recubierto de cobre	40	1084	10,45
Alambre de acero recubierto de cobre	30	1084	14,64
Varilla de acero recubierta de cobre	20	1084	14,64
Aluminio de 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
Acero 1020	10,8	1510	15,95
Varilla de acero recubierta de 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, 2000)

2.4 CONDUCTOR DE COBRE DESNUDO DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

Los conductores de cobre desnudo pueden ser sólidos o cableados, y puede ser suministrados con temple duro, semiduro o suave. Los conductores cableados son trenzados concéntricamente. Los conductores de cobre desnudo del tipo sólido y trenzado clases AA y A son utilizados para líneas de transmisión y distribución de energía eléctrica; conductores trenzados de mayor flexibilidad (clases B y C) son usados en sistemas de puesta a tierra de equipos eléctricos, subestaciones, entre otras aplicaciones (ELECTROCABLES, 2018).

2.4.1 CÁLCULO DE CONDUCTOR PARA TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Para el cálculo del calibre del conductor se debe aplicar la ecuación 1, ecuación 2 y la ecuación 5 reemplazando los siguientes valores.

$V = 120v$ (Voltaje entre fase-neutro)

$T = 3s$ Tiempo en segundos de despeje de la falla)

$Kf = 7.06$ (Constante para conductor de CU cuando se utiliza suelda exotérmica tabla 5)

$Z = 3\%$ (Impedancia de transformador dada por los fabricantes en porcentaje)

En la tabla 4 se muestra el resultado de los cálculos para los calibres recomendados del conductor de cobre para las puestas a tierra de los transformadores de distribución monofásicos. El calibre del conductor se determinó de acuerdo a lo descrito en la figura 13.

Tabla 4: Calibre recomendado para los sistemas de puesta a tierra para transformadores de distribución monofásicos.

Potencia [KVA]	Corriente Cortocircuito [A]	Área transversal del conductor [mm ²]	Calibre del conductor
3	833,33	5,16	10
5	1388,89	8,61	8
10	2777,78	17,21	4
15	4166,67	25,82	2
25	6944,44	43,03	1
37,5	10416,67	64,54	2/0
50	13888,89	86,06	3/0
75	20833,33	129,08	250

Fuente: Autor

Las normas nacionales e internacionales recomiendan que el calibre del conductor para sistemas de puesta a tierra para transformador monofásico de potencia menor a 15 KVA no sea menor a 2 AWG.

2.4.2 CÁLCULO DE CONDUCTOR PARA TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Para el cálculo del calibre del conductor se debe aplicar la ecuación 1, ecuación 3 y la ecuación 5 reemplazando los siguientes valores.

$V = 220v$ (Voltaje entre fase-fase)

$T = 3s$ Tiempo en segundos de despeje de la falla)

$K_f = 7.06$ (Constante para conductor de CU cuando se utiliza suelda exotérmica tabla 5)

$Z = 3\%$ (Impedancia de transformador dada por los fabricantes en porcentaje)

Tabla 5: Calibre recomendado para los sistemas de puesta a tierra para transformadores de distribución trifásicos.

Potencia [KVA]	Corriente Cortocircuito [A]	Área transversal del conductor [mm ²]	Calibre del conductor
30	2624,32	16,26	4
45	3936,48	24,39	2
50	4373,87	27,10	2
75	6560,80	40,65	1
100	8747,73	54,20	1/0
112,5	9841,20	60,98	2/0
125	10934,66	67,75	2/0
150	13121,60	81,30	3/0

Fuente: Autor

Las normas nacionales e internacionales recomiendan que el calibre del conductor para sistemas de puesta a tierra para transformadores trifásicos de potencia menor a 50 KVA no sea menor a 2 AWG.

Figura 13: Conductor de cobre desnudo. Sólidos y cableados.

CONDUCTOR					Peso Total Aprox (kg/km)	SEMIDURO		SUAVE	Capacidad de Corriente [A]*
CALIBRE [AWG o kcmil]	Sección Transversal [mm ²]	No. Hilos	Clase de Trenzado	Diámetro del conductor [mm]		Carga de Rotura [kgf]	Resistencia C.C. a 20°C [ohm/km]	Resistencia C.C. a 20°C [ohm/km]	
FORMACIÓN SÓLIDO									
14	2.08	1	Solido	1.63	18.49	76	8.49	8.45	35
12	3.31	1	Solido	2.05	29.43	119	5.33	5.31	45
10	5.261	1	Solido	2.59	46.77	187	3.36	3.343	68
8	8.37	1	Solido	3.264	74.38	292	2.11	2.102	95
6	13.3	1	Solido	4.12	118.24	461	1.34	1.323	129
FORMACIÓN CABLEADO CONCÉNTRICO									
14	2.08	7	B	1.84	18.71	69	8.603	8.46	35
12	3.31	7	B	2.32	29.78	110	5.412	5.35	45
10	5.261	7	B	2.93	47.33	175	3.401	3.35	68
8	8.37	7	B	3.70	75.28	277	2.151	2.10	95
6	13.3	7	B	4.66	119.66	435	1.354	1.32	129
4	21.15	7	B	5.88	190.28	683	0.851	0.830	170
2	33.62	7	B	7.42	302.47	1070	0.536	0.522	230
1	42.4	7	A	8.33	381.46	1340	0.428	0.413	275
1/0	53.5	7	AA, A	9.36	481.23	1681	0.337	0.328	319
1/0	53.5	19	B	9.46	481.23	1722	0.337	0.328	319
2/0	67.4	7	AA, A	10.51	606.74	2105	0.267	0.261	371
2/0	67.4	19	B	10.63	606.74	2161	0.267	0.261	371
3/0	85.0	19	B	11.94	764.90	2715	0.212	0.207	427

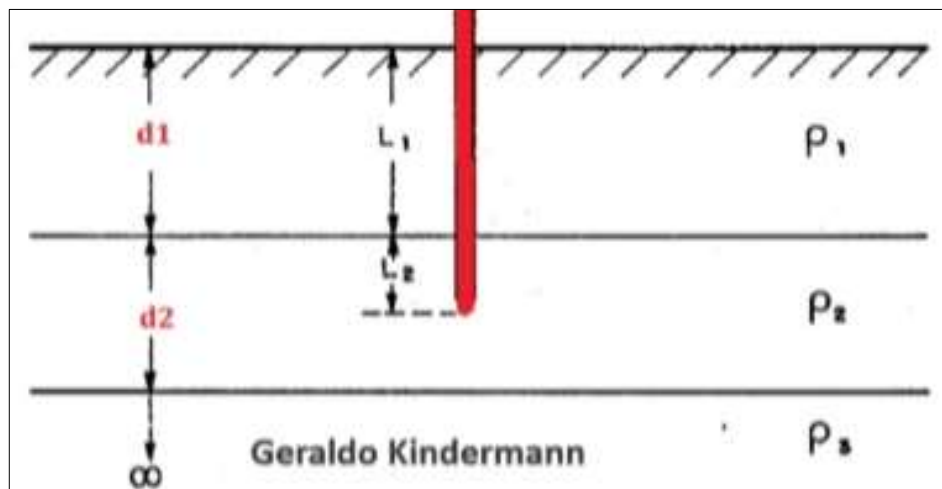
Fuente: (ELECTROCABLES, Conductor de cobre desnudo. Sólidos y cableados., 2018)

2.5 DETERMINACIÓN DE LA RESISTIVIDAD APARENTE DEL SUELO MEDIANTE LA FÓRMULA DE HUMMEL

Obtenidos los datos en campo sea por el método de Wenner o Schlumberger, se procede a calcular la resistividad aparente del suelo, este parámetro es muy importante para el diseño del sistema de puesta a tierra, para el caso de diseño de puestas a tierra de transformadores de distribución se ha mencionado la determinación de la modelación del suelo en dos capas, pero inclusive hay la posibilidad de realizarla hasta de 3 capas por medio de la utilización de la fórmula de Hummel.

En la figura 14 la línea vertical roja indica la disposición de una varilla de cobre enterrada verticalmente, tal como se observa se considera que, la varilla se encuentra ubicada entre la primera y segunda capa del suelo.

Figura 14: Jabalina en forma vertical considerando el modelo de dos capas



Fuente: (KINDERMANN, 2020)

Como se indica en la figura 14 si modelo del suelo fuera de dos capas la resistividad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\rho\alpha = \frac{L_1 + L_2}{\frac{L_1}{\rho_1} + \frac{L_2}{\rho_2}} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

$\rho\alpha$: Resistividad aparente del suelo

L_1 : Diámetro de la primera capa en la que atraviesa la varilla

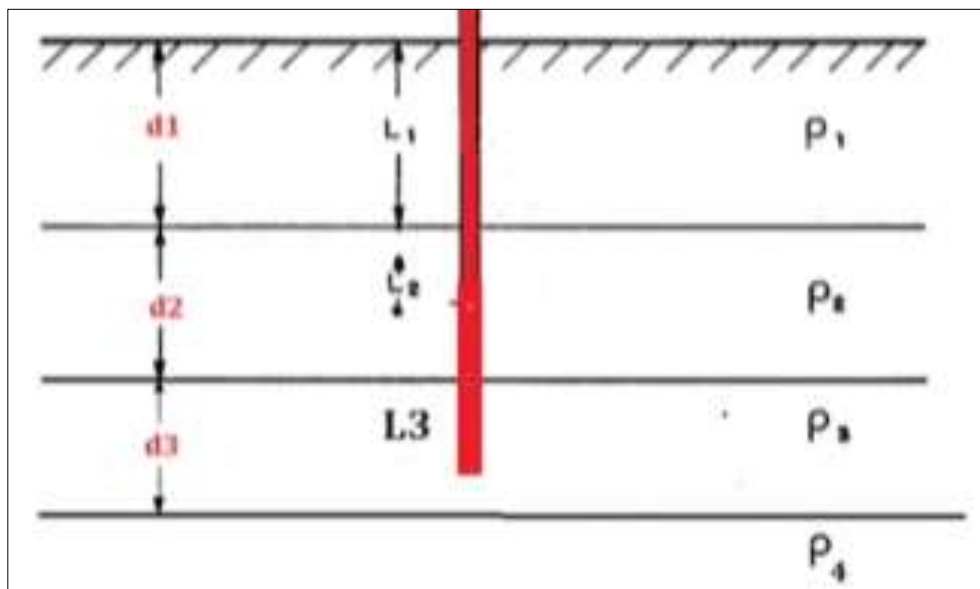
L_2 : Diámetro de la segunda capa en la que atraviesa la varilla

ρ_1 : Resistividad de la primera capa

ρ_2 : Resistividad de la segunda capa

En la figura 15 se muestra la disposición de una varilla enterrada en el suelo considerando que atraviesa 3 capas de suelo

Figura 15: Jabalina en forma vertical considerando el modelo de tres capas



Fuente: (KINDERMANN, 2020)

Como se indica en la figura 15 si modelo del suelo fuera de tres capas la resistividad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\rho\alpha = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{\frac{L_1}{\rho_1} + \frac{L_2}{\rho_2} + \frac{L_3}{\rho_3}} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

$\rho\alpha$: Resistividad aparente del suelo

L_1 : Diámetro de la primera capa en la que atraviesa la varilla

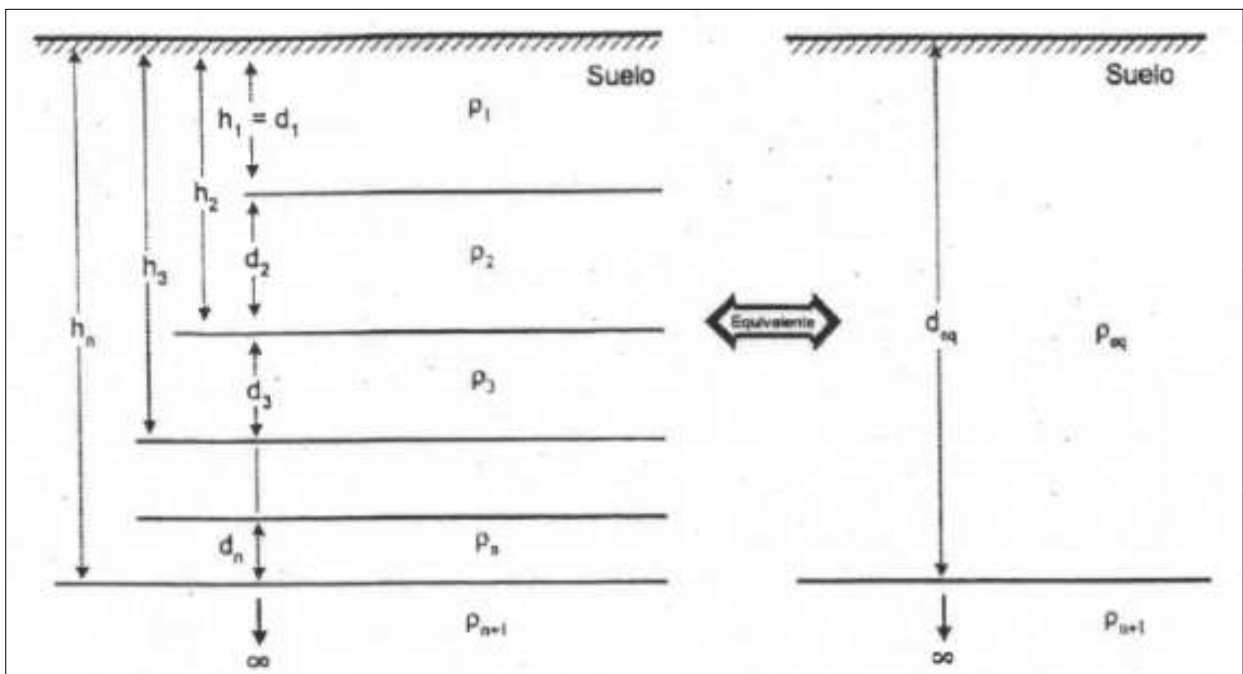
L_2 : Diámetro de la segunda capa en la que atraviesa la varilla

L_3 : Diámetro de la tercera capa en la que atraviesa la varilla

- ρ_1 : Resistividad de la primera capa
- ρ_2 : Resistividad de la segunda capa
- ρ_3 : Resistividad de la tercera capa

El cálculo de la resistividad aparente con un suelo con muchas capas debe ser reducido a un suelo equivalente a dos capas, el procedimiento de reducción se hace a partir de la superficie considerando paralelas las capas y mediante la fórmula de Hummel se transforma directamente a un suelo con dos capas. En la figura 16 se muestra un terreno multicapa y su equivalencia a dos capas.

Figura 16: Suelo multicapa equivalente a dos capas



Fuente: (KINDERMAN, 2010)

La fórmula para transformar a una equivalente a dos capas es la siguiente:

$$\rho_{eq} = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2}{\rho_2} + \frac{d_3}{\rho_3} + \dots + \frac{d_n}{\rho_n}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_t}{\sum_{i=1}^n \frac{d_t}{\rho_t}} \quad \text{Ec. 8}$$

Fórmula para cálculo del espesor de la capa:

$$d_{eq} = d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n = \sum_{i=1}^n d_t \quad \text{Ec. 9}$$

2.6 VALORES RECOMENDADOS DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

En la actualidad existen varias normas que estandarizan e indican el valor máximo permitido para el sistema de puesta a tierra, actualmente a nivel nacional han optado por regirse a normas internacionales como la IEEE Std 80-2000 y la norma IEEE Std 80-2013 entre otras existen lineamientos como en el portal de compras públicas en su documento especifica que para el montaje de transformadores y equipos las varillas de puesta a tierra se colocará a una distancia no menor de 0.65 m de la base del poste, colocada mediante excavación (en caso de suelo duro) y conectada mediante suelda exotérmica #90. Si la medición de la resistencia de puesta a tierra resulte ser mayor a 25 Ohmios, deberá aumentarse las varillas de acuerdo al procedimiento vigente, estos valores serán reportados a fiscalización. (COMPRAS P., 2020).

De igual manera en el portal de la empresa eléctrica Quito, especifica que el proyectista deberá seleccionar una de las disposiciones para la conexión a tierra, que se muestran en la Parte “B” Sección B-50, (EEQUITO, 2014) de acuerdo al valor de la resistividad del terreno, a fin de obtener un valor de resistencia de puesta a tierra de 25 ohmios para instalaciones aéreas y 5 ohmios para instalaciones subterráneas. De las normas mencionadas anteriormente se extrajo los valores indicados en la tabla 4, con la que actualmente se construye y fiscaliza el valor de resistencia de los sistemas de puesta a tierra.

Tabla 6: Valores recomendados de resistencia de puesta a tierra

Descripción	Resistencia (Ohms)
Estructuras de líneas de transmisión	20
Subestaciones de alto y extra alto voltaje ($\geq 115\text{kV}$)	1
Subestaciones de medio voltaje de uso exterior en poste o interior	10
Instalaciones de redes eléctricas aéreas media tensión (7.9 – 13.8 kv)	25
Instalaciones de redes eléctricas subterráneas (7.9 – 13.8 kv)	5
Neutro de acometida en baja tensión (110 – 220 V)	25
Equipos electrónicos sensibles	5

Fuente: (Std 80-2013 IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, 2015) & (EEQUITO, Normas para sistemas de distribución parte A, 2014)

2.6.1 Cálculo de la resistencia de puesta a tierra

En la norma (IEC 60364-5-54) especifica las ecuaciones para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra y expone las siguientes características:

- La resistencia del electrodo de tierra depende de su dimensión, su forma y la resistividad del terreno en el cual está embebido. Esta resistividad es a menudo variable de un lugar a otro, y varía con la profundidad.
- La resistividad de un terreno se expresa en $\Omega \cdot m$: numéricamente es la resistencia en Ω de un cilindro de $1m^2$ de sección transversal y con 1 m de longitud.
- La resistividad del terreno depende de su humedad y de su temperatura. La humedad misma está influenciada por la granulación del terreno y su porosidad. En la práctica aumenta la resistividad del terreno cuando la humedad decrece.
- Los terrenos helados a muy bajas temperaturas incrementan su resistividad, que puede alcanzar varios miles de $\Omega \cdot m$ en las capas heladas. El espesor de esta capa helada puede ser de hasta 1 m en algunas zonas.
- La sequedad también aumenta la resistividad del terreno. Los efectos de la sequía pueden alcanzar en algunas zonas más de 2 m de profundidad. Los valores alcanzados por la resistividad pueden ser del mismo orden que los alcanzados en las capas heladas.
- La longitud de las varillas debería incrementarse en 1 m o 2 m donde exista riesgo de helada o sequedad.
- Cuando el conductor se encuentra embebido en la cimentación del edificio los electrodos de tierra consisten en un anillo de cimentación que rodea todo el edificio.
- En zanjas horizontales los conductores están enterrados a una profundidad de alrededor de un metro.

Para el caso de un conductor enterrado horizontal, la resistencia de tierra, en función de la resistividad del terreno, es:

$$R = \frac{2 \cdot \rho}{L} \quad \text{Ec.6}$$

Donde:

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

L: Longitud total del conductor (m)

Para el caso de una pica vertical aislada, la resistencia de tierra, en función de la resistividad del terreno, es:

$$R = \frac{\rho}{L} \quad \text{Ec.7}$$

Donde:

ρ : Resistividad del terreno (Ohm*m)

L: Longitud de una pica (m)

Para el caso de un grupo de picas, la resistencia de tierra, en función de la resistividad del terreno, se calcula de la forma siguiente:

$$R_p = \frac{K * R_{1p}}{n} \quad \text{Ec.8}$$

$$R_{1p} = \frac{\rho}{L} \quad \text{Ec.9}$$

Donde:

R_p : Resistencia del grupo de 'n' picas dispuestas en paralelo (Ω)

R_{1p} : Resistencia de una pica (Ω)

N: Número de picas dispuestas en paralelo

K: Coeficiente de mejora que depende del número de picas, de su disposición y separación (D), así como de la longitud total de las mismas (L)

ρ : Resistividad del terreno (Ωm)

L: Longitud de una pica (m)

Al tratarse de picas dispuestas en paralelo unidas mediante un cable conductor, la resistencia total se calcula de la forma siguiente:

$$\frac{1}{R_g} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_c} \quad \text{Ec.10}$$

La resistencia conseguida para el conjunto de electrodos de la instalación de puesta a tierra se calcula de la forma siguiente:

$$\frac{1}{R_t} = \sum \frac{1}{R_e} \quad \text{Ec.11}$$

2.7 MEJORAMIENTO EN PUESTAS A TIERRA PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

El mejoramiento de las puestas a tierra involucra tratar de mejorar las condiciones físicas del sistema, a fin de obtener un diseño que este dentro de los parámetros establecidos por las normativas, a continuación, se presentan algunos métodos de mejora, para adquirir un valor de la resistencia ideal de un sistema de puesta a tierra.

2.7.1 Aumento del número de electrodos

En el Código De Práctica Ecuatoriano CPE INEN 19:2001, en la sección 250-84 indica que, un electrodo único, que consista en una varilla, tubería o placa y que no tenga una resistencia a tierra de 25 Ohms o menos, se debe complementar con un electrodo adicional de cualquiera de los tipos especificados en 250-81 o 250-83. Cuando se instalen varios electrodos de barras, tubos o placas para cumplir los requisitos de esta sección, se deben colocar a una distancia mínima de 1,83 m entre sí y deben estar efectivamente conectados entre sí. (INEN, 2018)

NOTA: La instalación en paralelo de varillas de más de 2,4 m aumenta la eficiencia si se separan más de 1,8 m. (INEN, 2018)

Considerando lo descrito en la sección 250-84 del Código Eléctrico Nacional Ecuatoriano se determina que al aumentar el número de varillas y aumentar la longitud en los sistemas de puesta a tierra, se obtendrá una disminución de la resistencia de puesta a tierra.

En conclusión, en la práctica, es muy recomendable aumentar el número de electrodos debido a que es una manera muy efectiva de reducir significativamente la resistencia de puesta a tierra, también se debe considerar como indica la norma 250-84 la distancia entre varillas, debido a la generación de potencial eléctrico generado en el electrodo, en un sistema de puesta a tierra con electrodos a una corta distancia no reduciría la resistencia y produciría efectos secundarios.

2.7.2 Mejoramiento de la resistencia de puesta a tierra mediante el aumento de la longitud de la varilla de cobre

En el Ecuador se comercializa varillas copperweld con diámetros entre 1.20 m y 2.4 m, pero existe casos donde las capas superiores son de piedra, arena y la capa ideal se encuentra por debajo del diámetro máximo de varillas de cobre que se comercializa, para

estos casos existen varillas roscadas que se acoplan a otras para lograr longitudes mayores a la que necesitamos.

En la siguiente tabla se evalúa el comportamiento de la resistencia de puesta a tierra de una varilla de cobre enterrada verticalmente a 60 cm de profundidad a una resistividad del terreno de $50\Omega\text{m}$, con una varilla Copperweld, de $0,016\text{m}$ de diámetro y variando su longitud, el valor de la longitud se toma de las varillas que se comercializan actualmente. Para la obtención de datos se obtuvieron mediante el software CYPELEC Grounding IEC.

Tabla 7: Valores de resistencia de puesta a tierra variando la longitud de la varilla.

Resistividad del terreno [Ωm]	Longitud de la varilla [m]	Diámetro de la varilla [m]	Resistencia de puesta a tierra [Ω]
50	1,20	0,016	33,33
50	1,50	0,016	27,78
50	1,80	0,016	23,81
50	2,40	0,016	18,52
50	3	0,016	15,15

Fuente: Autor

Como podemos observar en la tabla 8, a medida que se aumenta la longitud de la varilla disminuye la resistencia de puesta a tierra y se evidencia que el método de variar la longitud de la varilla parece una buena técnica, pero no se recomienda utilizar varillas a más de 3 metros de longitud, debido a que el valor económico de la varilla, aumenta de precio a mayor longitud, además que en ocasiones no se presenta un terreno homogéneo.

2.7.3 Adecuación de la resistividad del terreno según las normas IEEE Std 80-2000

Anteriormente se ha expuesto que, al aumentar el número de varillas, utilizar varillas con mayor longitud y el uso de varillas en paralelo, baja la resistencia a tierra, sin embargo, cuando lo descrito no es posible, se tiene que mejorar el terreno mediante diferentes métodos químicos detallados en la norma IEEE 80 – 2000.

A menudo es imposible lograr la deseada reducción de la resistencia de tierra mediante la adición de más conductores a la malla o más barras de tierra. Una solución alternativa es aumentar la eficacia del diámetro de la varilla mediante la modificación del suelo que rodea al electrodo. La cubierta interna del suelo más cercana al electrodo, suele estar compuesta por la capa de mayor resistividad. La modificación del terreno que rodea la puesta a tierra, se

puede realizar utilizando los siguientes métodos:

- a. Usando cloruro de sodio, magnesio y sulfatos de cobre, o cloruro de calcio, para incrementar la conductividad del suelo que rodea un electrodo. El estado o las autoridades federales pueden no permitir el uso de este método debido a la lixiviación (lavado o filtrado del suelo) posible a las áreas circundantes. Además, el tratamiento con sal debe ser renovada periódicamente.
- b. Usando bentonita, una arcilla natural que contiene los minerales montmorillonite, que se formó hace unos años por la acción volcánica. No es corrosivo, estable y tiene una resistividad de $2,5 \Omega \cdot m$ y una humedad del 300%. Los resultados de baja resistividad principalmente de un proceso electrolítico entre el agua, Na_2O (óxido de sodio), K_2O (óxido de potasio), CaO (Óxido de Calcio – Cal Viva), MgO (Óxido de magnesio), y otras sales minerales que se ionizan formando un electrolito fuerte con un pH de 8 a 10. Este electrolito no se filtrará gradualmente, ya que forma parte de la propia arcilla. Siempre con una cantidad suficiente de agua, se hincha hasta 13 veces su volumen en seco y se adherirá a cualquier superficie que toca. Debido a su carácter higroscópico, actúa como agente de secado de sacar la humedad disponible en el medio ambiente circundante. La Bentonita necesita de agua para obtener y mantener sus características beneficiosas. Su contenido de humedad inicial se obtiene en la instalación cuando la mezcla se prepara. Una vez instalada, la bentonita se basa en la presencia de humedad en el suelo para mantener sus características. La mayoría de los suelos tienen suficiente humedad para que el secado sea una preocupación. La naturaleza higroscópica de la bentonita aprovechará el agua disponible para mantener su condición de instalación. Si se expone a la luz solar directa, tiende a aislarse, previniendo el proceso de secado de las partes más profundas. No puede funcionar bien en un ambiente muy seco, ya que puede retroceder ante el electrodo, aumentando la resistencia del electrodo.
- c. Usando electrodos del tipo químico que consiste en un tubo de cobre lleno de una sal. Los agujeros en el tubo permiten que la humedad entre, las sales se disuelvan, y la solución de sales se filtre en el suelo. Estos electrodos se instalan en un agujero predicho y, normalmente, relleno de tierra, con el tratamiento del suelo.
- d. Los materiales de mejora de tierra, algunos con una resistencia de menos de $0,12 \Omega \cdot m$ (alrededor del 5% de la resistividad de la bentonita), normalmente se colocan alrededor de la varilla en un agujero predicho o alrededor de los conductores a tierra en una zanja, ya sea en forma seca o premezclado. Algunos de estos materiales de mejora son

permanentes y no se filtrará ningún producto químico en el suelo. Otros materiales disponibles se mezclan con el suelo en cantidades variables y poco a poco se filtrarán en el suelo circundante, disminuyendo la resistividad del terreno.

La bentonita entre otros compuestos como el sulfato de magnesio o de sulfato de cobre, o de compuestos químicos patentados THOR GEL, (GEM Cadweld de Erico), el GAP de Alta Conductividad 2000 S.A., GRAF de IPECSA, Cero-Ohm, Inte-France, etc.) estos materiales mencionados cumplen con los requisitos para la disminución de la resistencia de puesta a tierra

2.7.3.1 Ejemplo de modo uso de mejorador de suelo a base de bentonita (GEM Cadweld de Erico)

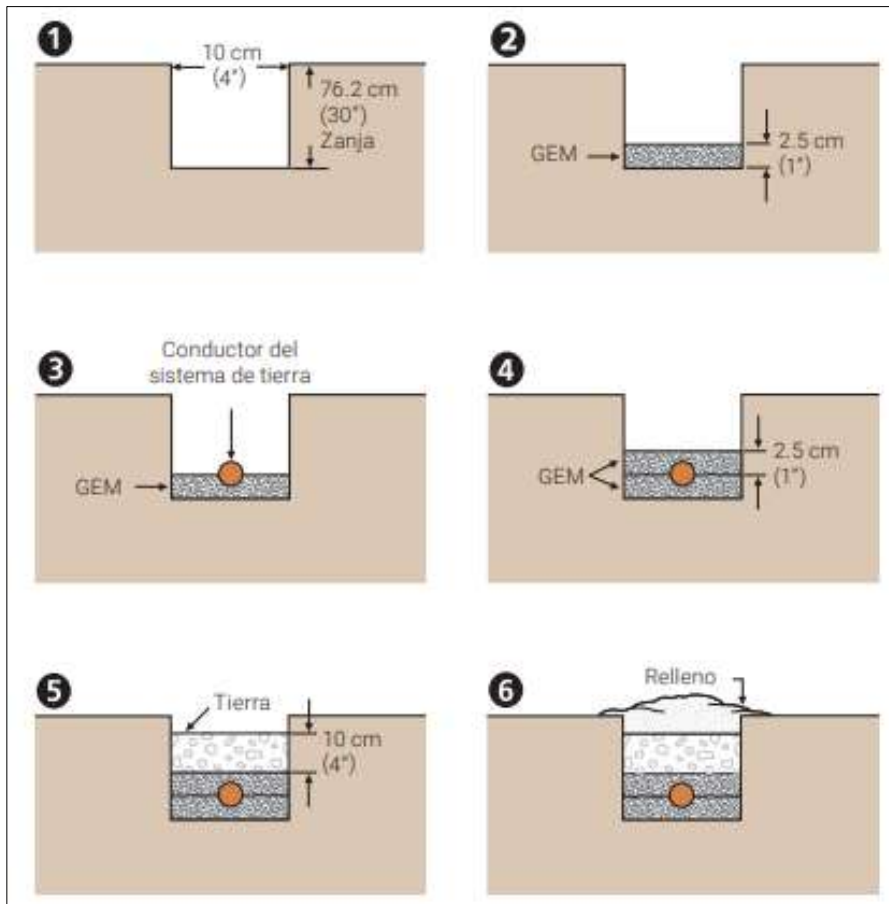
El tratamiento del suelo mediante GEM 25A reduce la resistividad del suelo en un 40-60% a continuación se presentan algunas características del Gel Químico a base de bentonita. (ERICO, nVent ERICO GEM. Material de Refuerzo de Tierra, 2021).

- Reduce dramáticamente la resistencia a tierra y medidas de impedancia
- Tras la curación del material, mantiene una resistencia constante durante toda la vida útil del sistema
- Mejora la puesta a tierra en todos los suelos, incluso durante períodos secos.
- No se disuelve ni descompone con el paso del tiempo
- No requiere tratamientos periódicos de carga ni reemplazos
- No requiere mantenimiento
- No depende de la presencia continua de agua para mantener su conductividad
- Evita la corrosión
- No se degrada
- No contamina
- No requiere humedad constante

2.7.3.2 Instrucciones instalación en zanjas

A continuación, se muestran las instrucciones para la utilización del gel químico (ERICO, nVent ERICO GEM. Material de Refuerzo de Tierra, 2021). En la figura 17 se muestra el método de instalación en zanja para conductor de cobre desnudo y se describe uno a uno como realizar la instalación.

Figura 17: Instrucciones para la instalación de gel químico sobre conductor desnudo



Fuente: (ERICO, nVent ERICO GEM. Material de Refuerzo de Tierra, 2021)

1. Pre mezclar el GEM para preparar una mezcla. Utilice de 1.5 a 2 galones (5.7 a 7.6 litros) de agua potable por bolsa o cubeta. Para preparar el GEM en forma de lechada, utilice un mezclador de concreto estándar o mezcle en una cubeta, caja mezcladora, carretilla, etc. Utilice de 1.5 a 2 galones (5.7 a 7.6 litros) de agua potable por bolsa o cubeta. No mezcle el GEM con agua salada.
2. Ponga suficiente mezcla de GEM para cubrir uniformemente el fondo de la zanja con más o menos 2.5 cm. (1 pulgada) de espesor.
3. Coloque el conductor sobre el GEM.
4. Ponga más GEM sobre el conductor hasta cubrirlo completamente con unos 2.5 cm. (1 pulgada) de espesor. Espere a que el GEM endurezca, aproximadamente de 30 minutos a una hora antes de poner el relleno natural de la zanja.

5. Cuidadosamente cubra el GEM con tierra hasta unos 10 cm. (4 pulgadas) de la superficie, cuidando que el conductor no quede expuesto.
6. Compacte la tierra y termine de cubrir la zanja con más tierra.

Nota 1: Espere a que el GEM endurezca, aproximadamente de 15 a 20 minutos antes de colocar el conductor. Se debe de instalar 10 cm. (4 pulgadas) de material aislante en los conductores y electrodos en la zona de interface (aire-terreno), empezando 5 cm. (2 pulgadas) dentro del GEM.

Nota 2: Quite el exceso de agua si hubiere.

En la figura 18 se muestra la instalación del gel químico en sistemas de puesta a tierra con varilla copperweld.

Figura 18: Instalación de gel químico para puesta a tierra

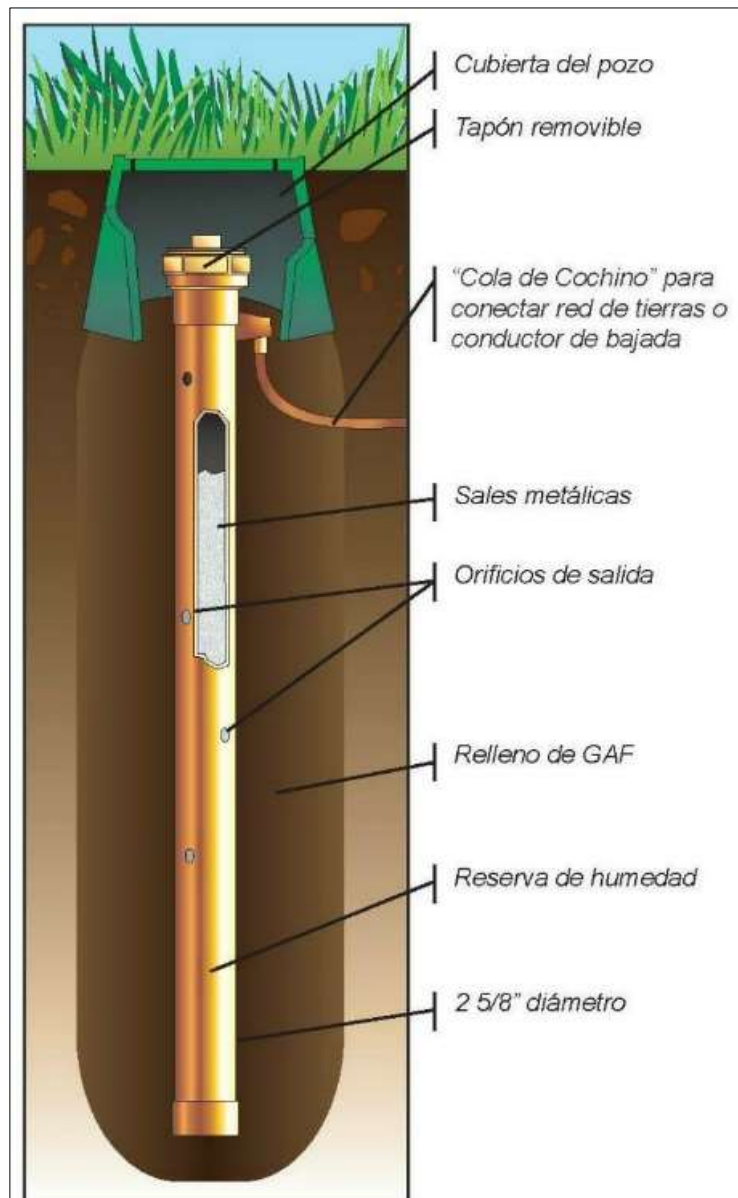


Fuente: (SEBATELEC, 2021)

2.7.3.3 Barras Químicas

Se utilizan barras químicas, debido a la rapidez en su instalación, en lugares donde es difícil instalar una malla de tierra común, como por ejemplo subterráneos de edificios, oficinas, hospitales, bancos, edificios habitacionales, pisos enlozados etc. Los electrodos químicos son una alternativa de tierra eléctrica muy versátil puesto que se pueden instalar de forma vertical, horizontal, diagonal o como lo permita el terreno. La profundidad a la que se instalan puede ser variable dependiendo de las características del suelo. Estos electrodos son una solución rápida, económica, versátil y de muy buen resultado para un sistema de puesta a tierra de baja tensión, computación (INTELEC, 2017). En la figura 19 se muestra un electrodo químico dispuesto verticalmente enterrado en el suelo.

Figura 19: Electrodo químico



Fuente: (INTELEC, 2017)

Estos electrodos pueden ser de 2, 3 o 4 pulgadas de cobre, dependiendo de los espesores y resistividades de las diferentes capas del terreno, estas barras se rellenan con sales solubles de bajas resistividades las que salen al exterior del tubo por perforaciones en todos los lados de este a lo largo de su estructura tal como se indica en la figura 19, con lo que se consigue una mejor resistividad debido a que las raíces logradas con las sales de baja resistividad alcanzan una superficie mayor. Estos electrodos cuentan también con un compuesto activador aplicado en el exterior de la estructura de cobre con el cual se busca mejorar la conductividad, mantener la humedad, evitar la corrosión natural que ofrece el suelo al cobre, para alcanzar así una mayor vida útil. No se recomienda instalar estos electrodos en zonas costeras o lugares que ofrezcan alta corrosión al cobre (INTELEC, 2017)

2.8 DISPOSICIÓN DE LAS VARILLAS COPPERWELD DETERMINADAS POR EL NEC ECUATORIANO

La varilla recomendada por normas nacionales para los sistemas de puestas a tierra para redes aéreas y la instalación de transformadores eléctricos de distribución para proyectos eléctricos es la varilla Copperweld, de 0,016m de diámetro y 1,80m de longitud, el valor máximo de resistencia de puesta a tierra establecido por las NEC ecuatorianas es de 25 Ohmios, dicho esto, determinaremos la resistividad del suelo máxima permitida para cada disposición de las varillas copperweld establecidas por la normativa ecuatoriana.

Para el cálculo de la resistividad máxima de cada disposición de las puestas a tierra detalladas en la normativa ecuatoriana, se utilizaron las formulas de la normativa IEC 60364-5-54)

Datos:

R : Resistencia máxima permitida de puesta a tierra = 25 (Ω)

ρ : Resistividad del terreno en (Ωm)

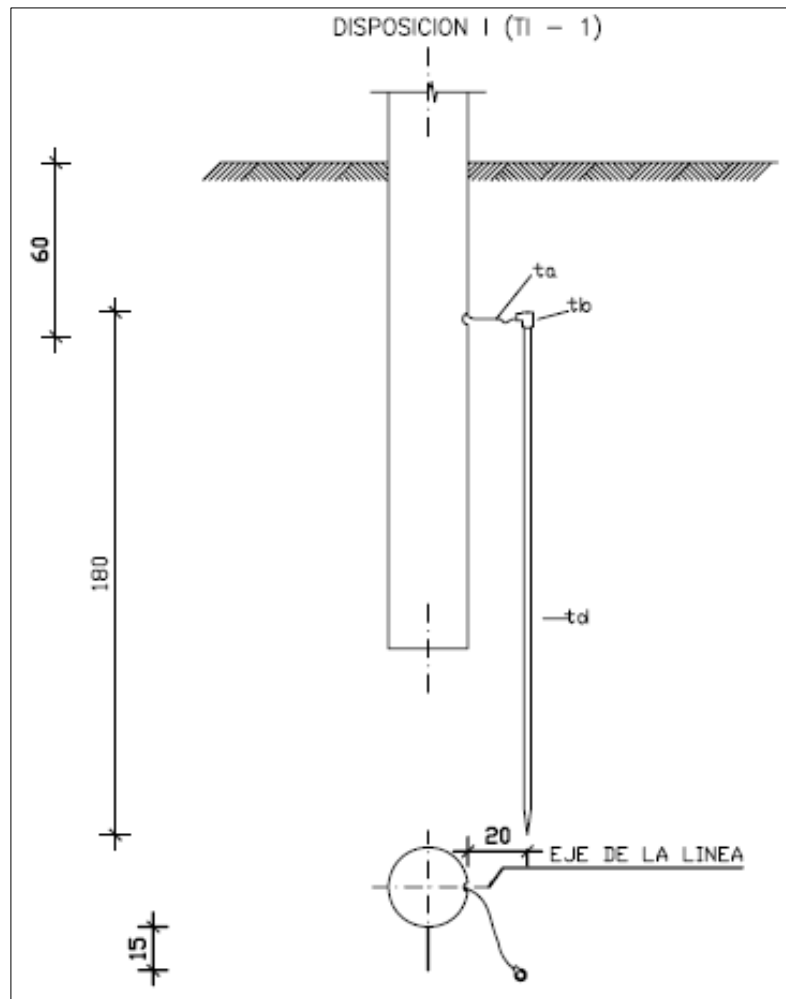
L : Longitud de la varilla de puesta a tierra = 1,8 (m)

K : Coeficiente de mejora D/L

2.8.1 Disposición 1 (TI – 1) (1 Varilla enterrada verticalmente)

En la figura 20 se muestra la disposición de una varilla copperweld enterrada verticalmente establecida por la norma ecuatoriana (EEQUITO, 2014).

Figura 20: Varilla dispuesta verticalmente



Fuente: (EEQUITO, 2014)

Como se puede observar la varilla de puesta a tierra se instala a 60 cm por debajo del suelo a 20 y 15 cm en relación al poste. Con los datos mencionados anteriormente y despejando la resistividad del terreno de la ecuación 7 se determinó el mínimo valor de la resistividad del suelo para obtener 25 ohmios de resistencia de puesta a tierra.

En donde:

$$\rho = RL = 25 * 1.80 = 45 \Omega m$$

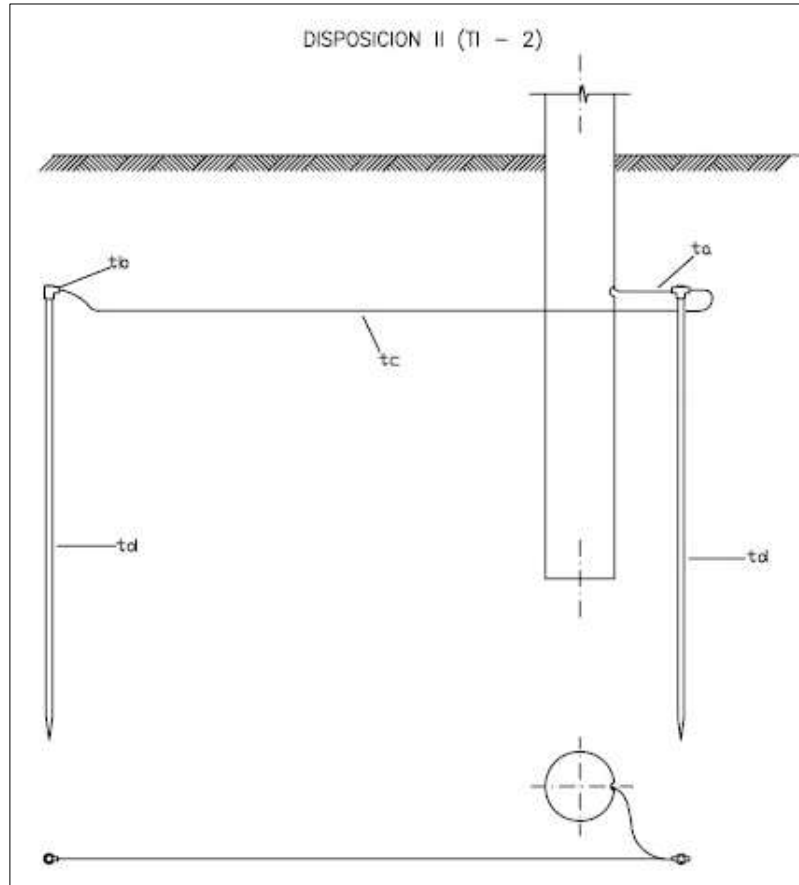
Entonces, la resistividad máxima permitida para instalar la disposición (TI - 1) es de 45Ωm.

En la normativa de (EEQUITO, 2014) en la sección B - 50 puestas a tierra determina que en una disposición TI-1 se puede aplicar en suelos de hasta 100 Ωm, mediante el cálculo se demuestra que es un valor menor al establecido.

2.8.2 Disposición 2 (T1 – 2) (2 Varillas enterradas verticalmente dispuestas en línea)

En la figura 21 se muestra la disposición de dos varillas copperweld dispuestas en línea enterradas verticalmente establecida por la norma ecuatoriana. (EEQUITO, 2014)

Figura 21: Disposición dos varillas verticales



Fuente: (EEQUITO, 2014)

Como se puede observar las varillas de puesta a tierra se instalan a 60 cm por debajo del suelo y a 20 y 15 cm en relación al poste para la primera varilla y la segunda varilla en el documento de normas para sistemas de distribución parte B (EEQUITO, 2014), para la configuración (T1 - 3) indica que la disposición de las 3 varillas deben estar a 7.50m, entonces para la separación entre varillas de (T1 - 2) será la mitad de dicho valor propuesto. Para encontrar el valor máximo de la resistividad del suelo para obtener 25 ohmios de resistencia de puesta a tierra se utilizó la distancia de 3.75 m y se partió de la ecuación 10.

En donde:

$$\frac{1}{R_g} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_c}$$

Mediante las ecuaciones 6, 8 y 9 se realizó los cálculos para determinar la resistividad máxima permitida para la disposición 2 (T1 – 2):

Despejando la ecuación Rc:

$$R_c = \frac{2 * \rho}{L}$$

$$R_c = \frac{2 * \rho}{4.35}$$

$$R_c = 0.58\rho$$

Y la ecuación para Rp:

$$R_p = \frac{K * R_{1p}}{n} ; R_{1p} = \frac{\rho}{L} ; K = \frac{D}{L}$$

$$R_p = \frac{K * \frac{\rho}{L}}{n} = \frac{1.04 * \frac{\rho}{1.80}}{2}$$

$$R_p = 0.28\rho$$

Se reemplazó las Ecuaciones Rc y Rp en:

$$\frac{1}{25} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_c}$$

$$\frac{1}{25} = \frac{1}{0.28\rho} + \frac{1}{0.58\rho}$$

Despejando ρ

$$\rho = 25 \left(\frac{1}{0.28} + \frac{1}{0.58} \right)$$

$$\rho = 132.4 \Omega m$$

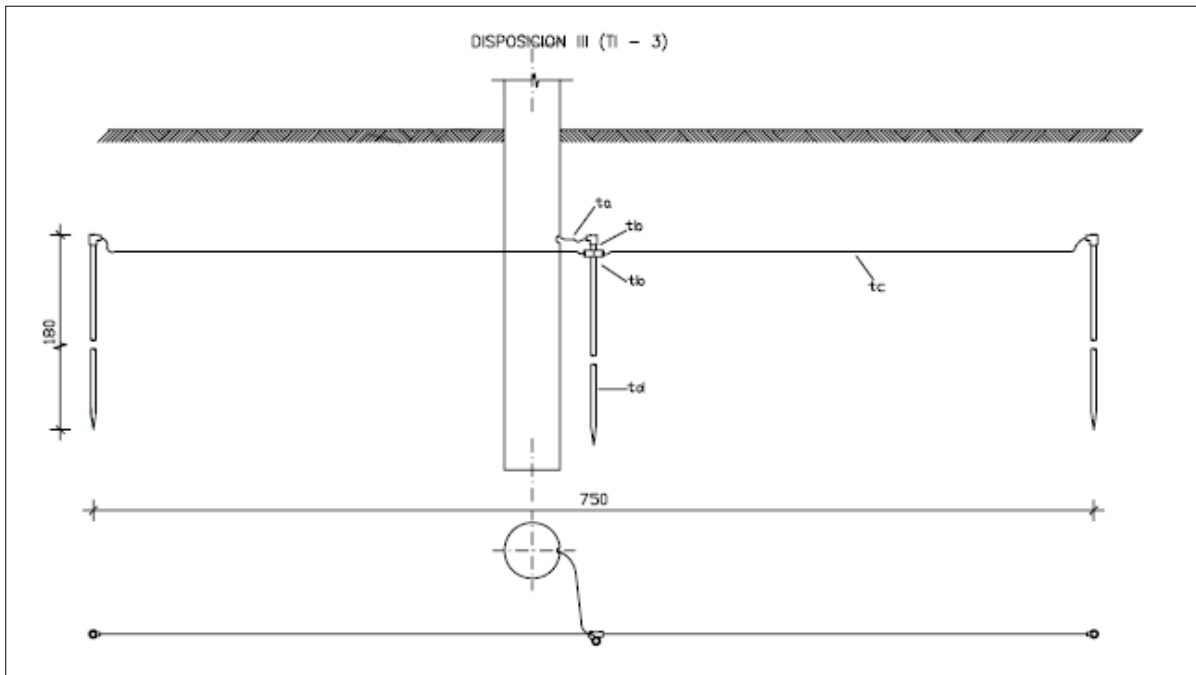
Entonces, la resistividad máxima permitida para instalar la disposición (TI - 2) es de 132.4Ωm.

En la normativa de (EEQUITO, 2014) en la sección B - 50 puestas a tierra determina que en una disposición TI-2 se puede aplicar en suelos de hasta 130 Ωm, lo que se demuestra que es un valor aproximado al calculado.

2.8.3 Disposición 3 (T1 – 3) (3 Varillas enterradas verticalmente dispuestas en línea)

En la figura 22 se muestra la disposición de tres varillas copperweld dispuestas en línea enterradas verticalmente establecida por la norma ecuatoriana. (EEQUITO, 2014)

Figura 22: Disposición 3 varillas verticales



Fuente: (EEQUITO, 2014)

Como se puede observar las varillas de puesta a tierra se instalan a 60 cm por debajo del suelo, la primera varilla se instala a 20 y 15 cm en relación al poste, la segunda y tercera varilla según el documento de normas para sistemas de distribución parte B (EEQUITO, 2014), para la configuración (T1 - 3) indica que deben estar a 7.50m entre ellas. Para encontrar el valor máximo de la resistividad del suelo y obtener 25 ohmios de resistencia de puesta a tierra, en el parámetro de la longitud se utilizó el valor medio que está dado por 3.75 m.

En donde:

$$\frac{1}{Rg} = \frac{1}{Rp} + \frac{1}{Rc}$$

Se utilizó las ecuaciones 6, 8 y 9 y hacemos los respectivos cálculos:

Despejando la ecuación Rc:

$$Rc = \frac{2 * \rho}{L}$$

$$R_c = \frac{2 * \rho}{8.10}$$

$$R_c = 0.25\rho$$

Despejando la ecuación Rp:

$$R_p = \frac{K * R_{1p}}{n} \quad ; \quad R_{1p} = \frac{\rho}{L} \quad ; \quad K = \frac{D}{L}$$

$$R_p = \frac{K * \frac{\rho}{L}}{n} = \frac{0.69 * \frac{\rho}{1.80}}{3}$$

$$R_p = 0.13\rho$$

Se reemplazó las ecuaciones Rc y Rp en:

$$\frac{1}{25} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_c}$$

$$\frac{1}{25} = \frac{1}{0.13\rho} + \frac{1}{0.25\rho}$$

Despejando ρ

$$\rho = 25 \left(\frac{1}{0.13} + \frac{1}{0.25} \right)$$

$$\rho = 292.3 \Omega m$$

Entonces, la resistividad máxima permitida para instalar la disposición (T1 - 3) es de 292.3Ωm.

En la normativa de (EEQUITO, 2014) en la sección B - 50 puestas a tierra, determina que en una disposición T1 - 3 se puede aplicar en suelos de hasta 200 Ωm de resistividad, mediante el cálculo se demuestra que es un valor mucho menor al obtenido.

Tabla 8: Resumen de las resistividades máximas permitidas para las disposiciones de puestas a tierra

Disposición	Resistividad Máxima [Ωm]
T1-1	45
T1-2	132.4
T1-3	292.3

Fuente: Autor

2.9 EQUIPO DE MEDICIÓN (TELUROMETRO)

En la figura 13 se muestra el equipo encargado para realizar sondeos eléctricos del suelo, también es utilizado para medir directamente la resistencia de los sistemas de puesta a tierra en los electrodos, la resistencia de puesta tierra la mide en ohmios y la resistividad del terreno en ohmios / metro.

Figura 23: Probador de resistencia de tierra



Fuente: (Industrial, 2021)

2.10 ANÁLISIS DE SOFTWARES PARA EL CÁLCULO DE LA RESISTIVIDAD Y RESISTENCIA APARENTE DEL SUELO

En el diseño de una puesta a tierra, la parte más difícil y esencial es la determinación de la resistividad del suelo y su estratificación en dos capas, es por ello que fue necesario encontrar una herramienta computacional que permita la modelación del suelo, y adquirir fácilmente los parámetros para el diseño del sistema. El proceso de encontrar la estratificación del suelo en dos capas y sus resistividades es muy complejo debido a los cálculos que se necesitan realizar, dicho esto en la web se encuentran algunos programas que pueden ser utilizados libremente por los profesionales.

Para esta investigación se realizó el análisis de dos herramientas computacionales de uso libre y gratuito las cuales son:

- Software Re2cap
- Software Ipi2win

Una vez concluida la adquisición de datos en campo, se procedió a interpretar los datos en los softwares mencionados y se comparó los resultados obtenidos que son base para validar los resultados finales del software a proponer en esta tesis.

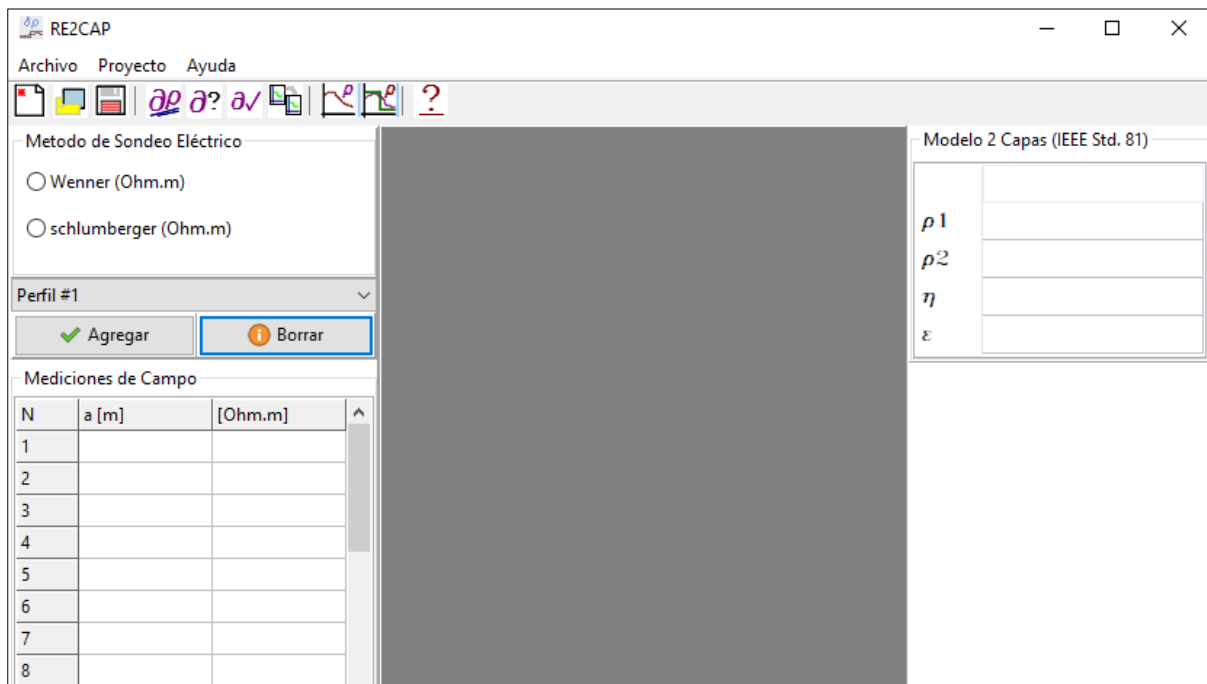
2.10.1 RE2CAP

El programa RE2CAP es un software gratuito (Freeware) que fue diseñado y desarrollado en principio para el área de ingeniería eléctrica de modo que sea una herramienta de modelamiento del suelo en dos capas a partir de la inversión de parámetros por métodos numéricos utilizando para el efecto una interfaz gráfica. Los resultados obtenidos pueden ser utilizados como base para diseños de malla de puesta a tierra. Se trata de un programa sencillo e intuitivo. El programa fue escrito en Free Pascal con el IDE LAZARUS y funciona bajo las plataformas de Windows XP/7/10. (JAGUA, 2021)

En esta versión, el programa puede calcular el modelo del suelo para sondeos eléctricos Wenner y Schlumberger contemplando el uso de dos capas. Para esto se emplea el método del gradiente descendente el cual es sugerido en el Std. IEEE 81 de 1983 y se incluye un método basado en búsqueda directa. Los resultados obtenidos corresponden a los valores de resistividad de la primera y segunda capa, la profundidad de la primera capa en metros y el error en porcentaje del modelo teórico obtenido con respecto a los puntos medidos en campo. Se incluye un documento en forma de reporte de resultados, el cual puede ser exportado en formato pdf (JAGUA, 2021).

La interfaz del programa es sencilla y se divide en dos secciones: la primera corresponde al ingreso general de datos (mediciones e información del sitio) y la segunda corresponde a resultados gráficos que muestran el modelo medido en campo y el modelo teórico. El menú de barras está provisto de una lista de opciones que incluyen comandos cuando ellos son seleccionados. Los datos ingresados en el programa pueden ser guardados en un archivo para ser revisados y analizados en un futuro. La figura mostrada a continuación ilustra la presentación del programa. En la figura 24 se muestra la interfaz del programa Re2cap (JAGUA, 2021).

Figura 24: Interfaz del programa Re2cap



Fuente: (JAGUA, 2021)

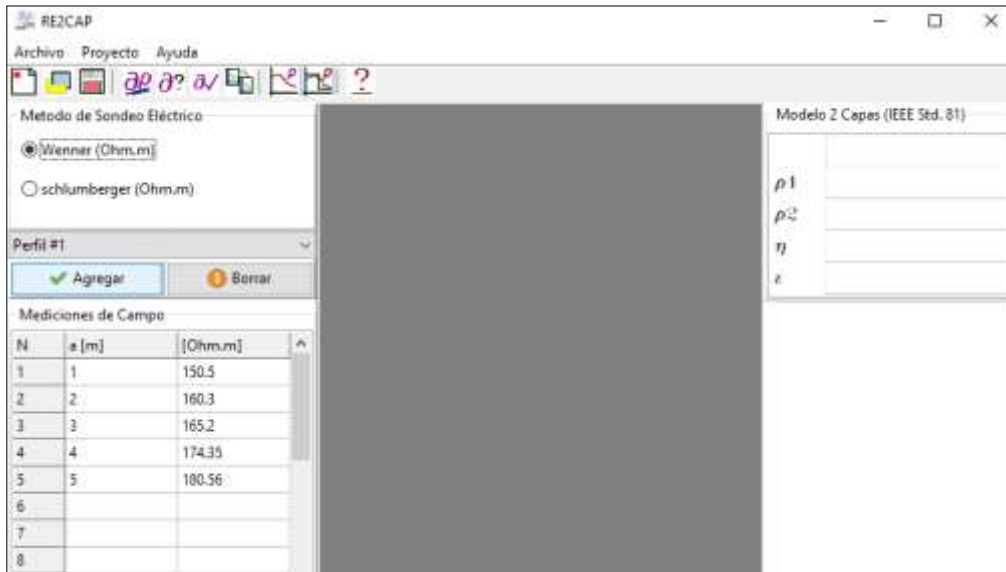
2.10.1.1 Procedimiento de utilización

El programa es sencillo y muy simple. A continuación, se presenta un ejemplo explicando cómo llevar a cabo el cálculo del modelo de la resistividad del terreno.

El usuario debe tener en cuenta que no existe una única solución al problema inverso y por esta razón pueden presentarse múltiples valores de resistividad que garanticen un error adecuado. No obstante, los algoritmos incorporados en el programa convergen a un valor preciso en la gran mayoría de los casos para el modelo del suelo en dos capas. Teniendo en cuenta esto último, el programa permite el ingreso manual de un modelo de dos capas (valor de resistividad y profundidad) definido por el usuario y verificar el error obtenido con dicho modelo. (JAGUA, 2021)

Para iniciar se debe seleccionar el tipo de sondeo eléctrico (Wenner o Schlumberger) y luego ingrese los datos de mediciones en campo, el programa permite hasta 30 puntos de mediciones. No se deben dejar filas intermedias sin llenar. Luego se deben guardar los datos del perfil usando el botón "Agregar". Tal como se indica en la figura Si se tienen más perfiles de mediciones se debe cambiar el perfil e ingresar los datos y como en el caso anterior utilizar el botón "Agregar". Se permite el uso de 8 perfiles de resistividad como máximo. El programa efectuara el cálculo del modelo con base en el valor promedio de todos los perfiles ingresados.

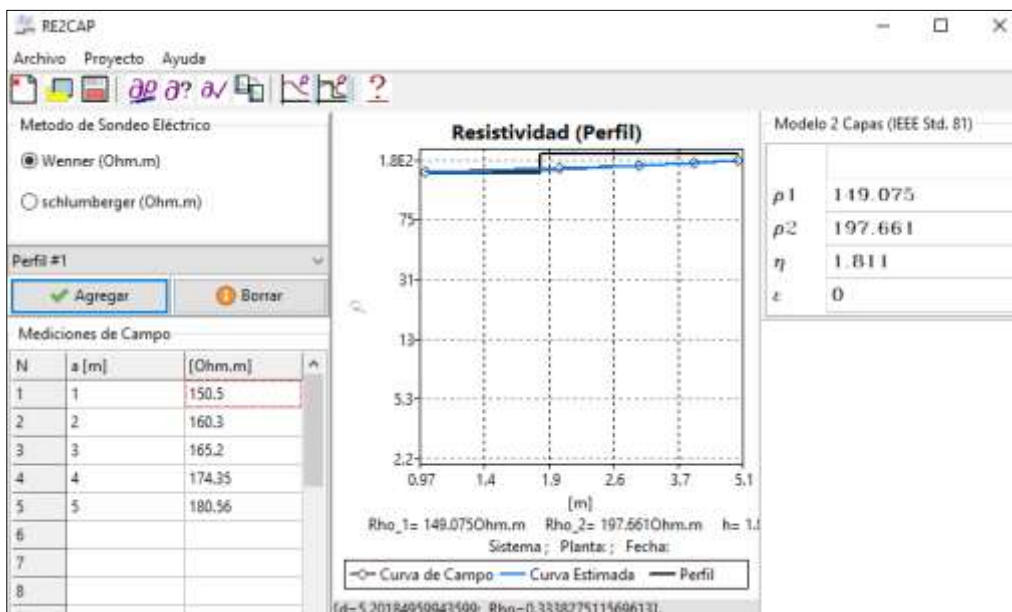
Figura 25: Ingreso de datos Re2cap



Fuente: Autor

El cálculo se puede realizar desde el icono o bien desde la ruta del menú de opciones: proyecto Cálculo. Después de esto aparecerá una gráfica que muestra la curva de resistividad aparente con los datos tomados en campo. Además, se muestra la curva de resistividad aparente con el modelo calculado. En la parte derecha aparecen los datos correspondientes al modelo de dos capas. El error del modelo obtenido con respecto a las mediciones en campo es presentado en porcentaje (JAGUA, 2021). Al interior de la gráfica también podrá ver los valores en donde se posiciona el cursor tal como se muestra en la figura 26.

Figura 26: Curva de campo y resultados Re2cap



Fuente: Autor

Mediante el icono el programa agrega una curva indicando el modelo utilizado. La curva muestra los valores de resistividad y profundidad de la primera capa y la resistividad de la segunda capa. Además, en el menú proyecto se pueden seleccionar las curvas que se desean que aparezcan en el gráfico.

2.10.2 IPI2WIN

El IPI2WIN permite obtener un modelo estratificado del suelo, realiza interpretaciones de sondeos eléctricos verticales (SEV) a partir de datos obtenidos en campo mediante el método de Wenner y Schlumberger. Es un software desarrollado por la Moscow State University, Geological Faculty, Department of Geophysics.

Este programa es propuesto como ayuda a la solución técnica para el diseño de puestas a tierra de los transformadores de distribución, esta es una versión para universidades, pero puede ser utilizado por profesionales dedicados a la elaboración de proyectos eléctricos, ya que permite obtener modelos de suelos hasta de 30 capas. IPI2Win está diseñado para la interpretación automática o semi-automática de datos de sondeo eléctrico vertical obtenidos con varios de los arreglos utilizados con más frecuencia en la prospección eléctrica. IPI2Win puede ser corrido en cualquier computadora personal IBM compatible con sistema operativo Windows 95/98/NT/2000/XP/7 y10 (GEOSCAN, 2000).

IPI2Win está diseñado para la interpretación 1D de las curvas de sondeo eléctrico vertical a lo largo de un perfil. Se supone que el usuario es un interpretador con experiencia suficiente para resolver problemas geológicos y lograr el ajuste de las curvas de sondeos teórica y calculada. Su enfoque a la obtención de un resultado geológico en la característica que distingue a IPI2Win de otros programas populares de inversión automática. (GEOSCAN, 2000). En la figura 27 se muestra la pantalla de la interfaz del programa.

Figura 27: Interfaz IPI2WIN

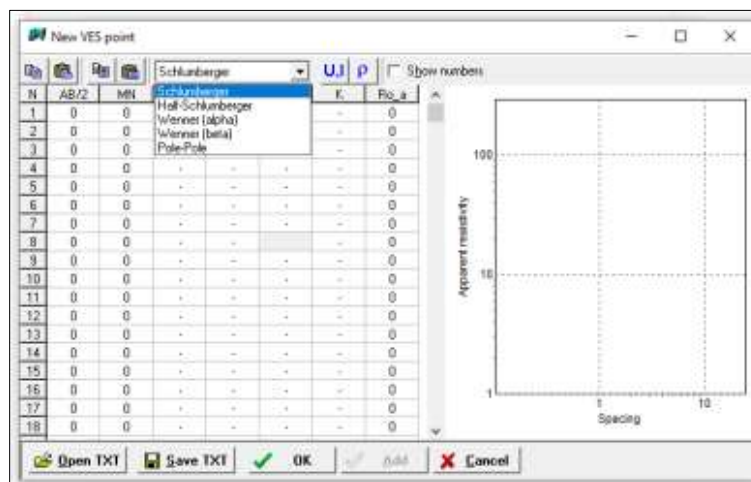


Fuente: (GEOSCAN, 2000)

2.10.2.1 Procedimiento de utilización

Este programa permite introducir los datos obtenidos en campo, en la barra de herramientas archivo se selecciona la opción crear o en su efecto damos click en nuevo documento, en la figura 28 se muestra la pantalla donde ingresa los datos y se escoge el método de medición en campo utilizado.

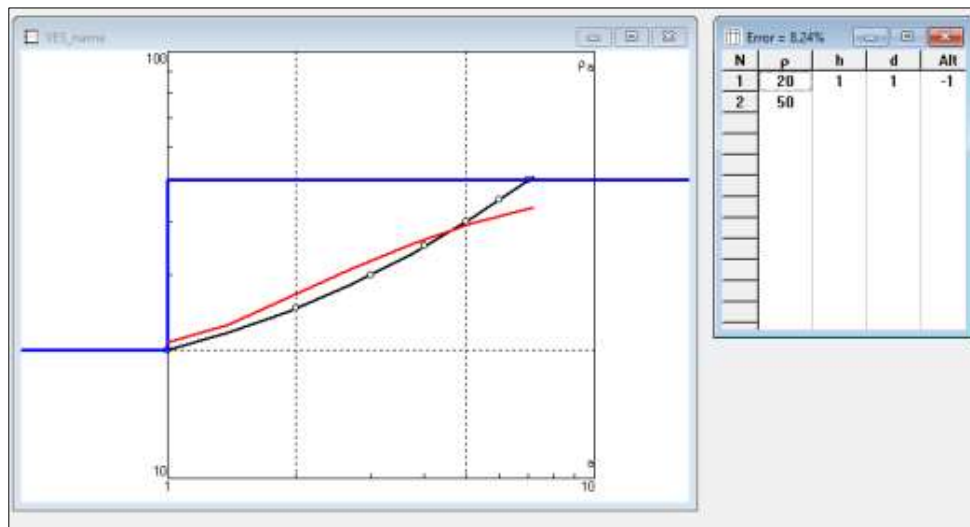
Figura 28: Pantalla ingreso de datos



Fuente: (GEOSCAN, 2000)

Después de ingresar los datos de campo se guarda el archivo, se da click en OK y procede a mostrar una determinación del suelo en dos capas (curva roja). El programa también muestra el porcentaje de error entre la curva de campo y el modelo en la figura 29 se muestra la curva de campo y teórica generada por el programa.

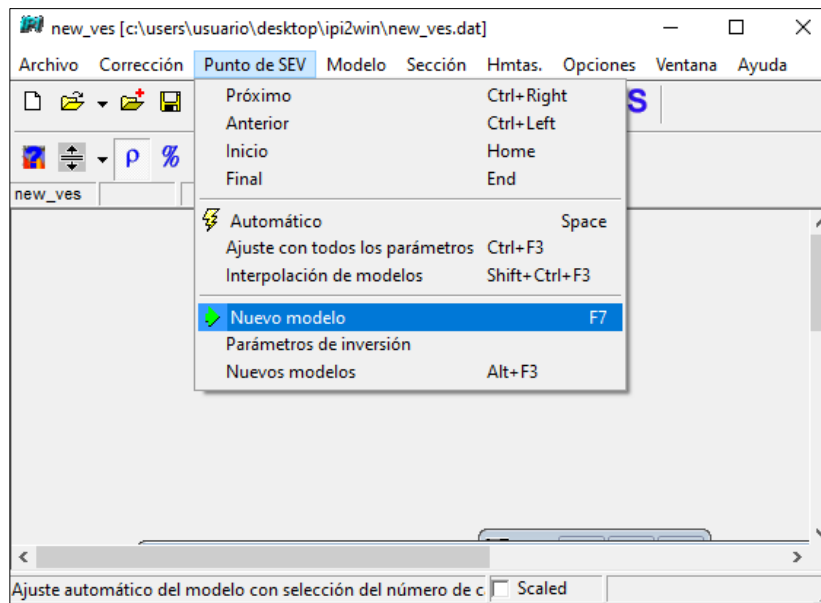
Figura 29: Curva de resistividad y campo



Fuente: (GEOSCAN, 2000)

Se puede determinar un nuevo modelo con menor porcentaje de error, para ello se dirige hacia el menú “Punto de SEV”, opción Nuevo modelo:

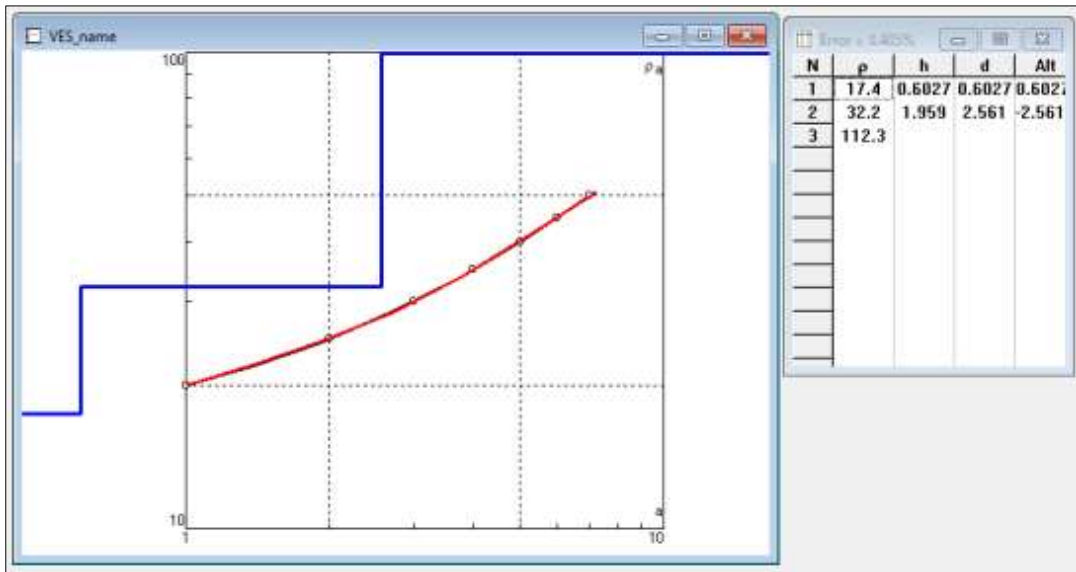
Figura 30: Menú para nueva modelación



Fuente: (GEOSCAN, 2000)

El programa permite obtener un nuevo modelo con un error de aproximación mínimo y aceptable para continuar con el proceso de diseño de puesta a tierra.

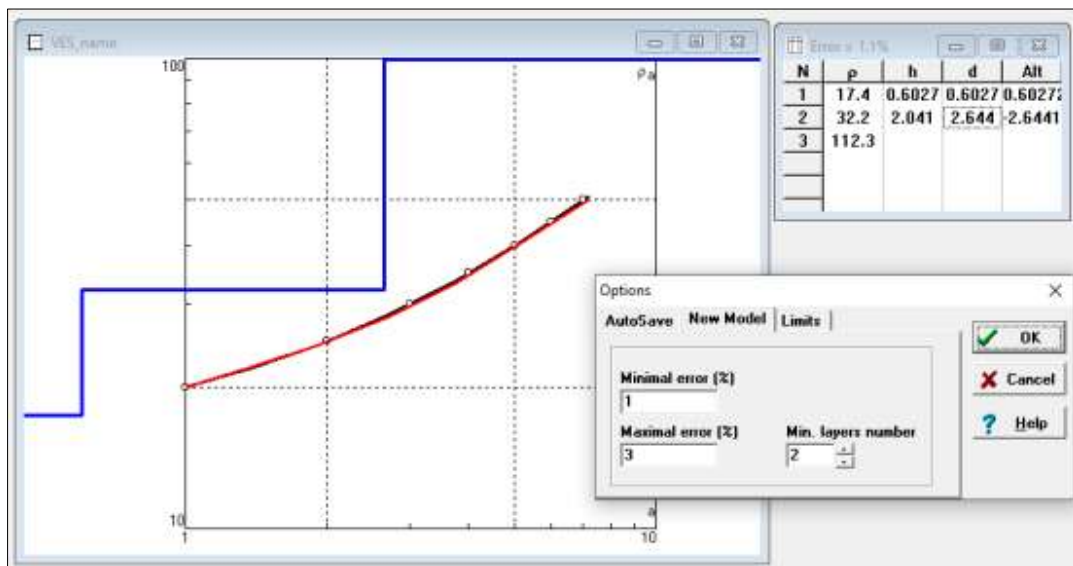
Figura 31: Ajustes del nuevo modelo determinado por el programa



Fuente: (GEOSCAN, 2000)

El IPI2WIN también permite obtener modelos de más estratos, para lo cual se dirige a la opción “Punto de SEV”, opción parámetros de inversión y se procede a configurar el número de capas:

Figura 32: Parámetros de inversión y elección de numero de capas



Fuente: (GEOSCAN, 2000)

El software IPI2WIN ayuda dentro de la rama eléctrica en la construcción de los sistemas de puestas a tierra, permite realizar el modelamiento del suelo de una manera rápida y eficaz, ayuda a conseguir las resistividades del suelo para futuras interpretaciones como el cálculo de la resistencia aparente del suelo.

2.11 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA APARENTE DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

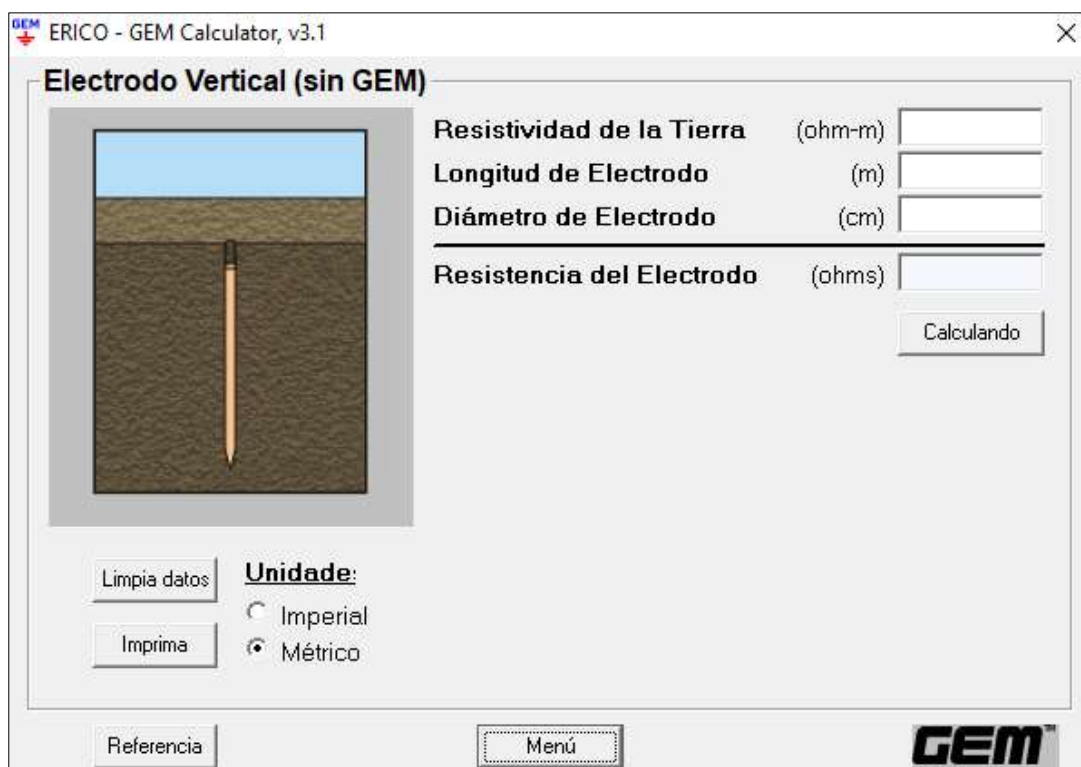
Para complementar el diseño de las puestas a tierra apegado a la normativa ecuatoriana es necesario incorporar una aplicación más para determinar la resistencia aparente del suelo entre las herramientas informáticas buscadas se encontró los siguientes programas:

- ERICO GEM Calculator
- CYPELEC Grounding IEC

2.11.1 ERICO GEM Calculator

Originariamente, esta herramienta sin coste la creó ERICO. La última versión de esta aplicación puede instalarse en ordenadores con Windows XP/Vista/7/8/10 tanto de 32 como de 64 bits (ERICO, 2021). En la figura 33 se muestra la interfaz del programa Erico

Figura 33: interfaz del programa ERICO



Fuente: (ERICO, 2021)

2.11.1.1 Procedimiento de cálculo

En la interfaz del programa se ingresan los datos de resistividad aparente del suelo, longitud del electrodo y diámetro del electrodo, la herramienta procede a calcular la resistencia aparente haciendo click en calculando, es un programa sencillo que ayuda a realizar el cálculo de una forma rápida y sencilla.

2.11.2 CYPELEC Grounding IEC

CYPELEC Grounding IEC es una Aplicación gratuita que permite calcular la resistencia de puesta a tierra de las instalaciones eléctricas en base a la norma IEC 60364-5-54. El programa está integrado en el flujo de trabajo Open BIM a través de la plataforma BIMserver.center (CYPELEC, 2021).

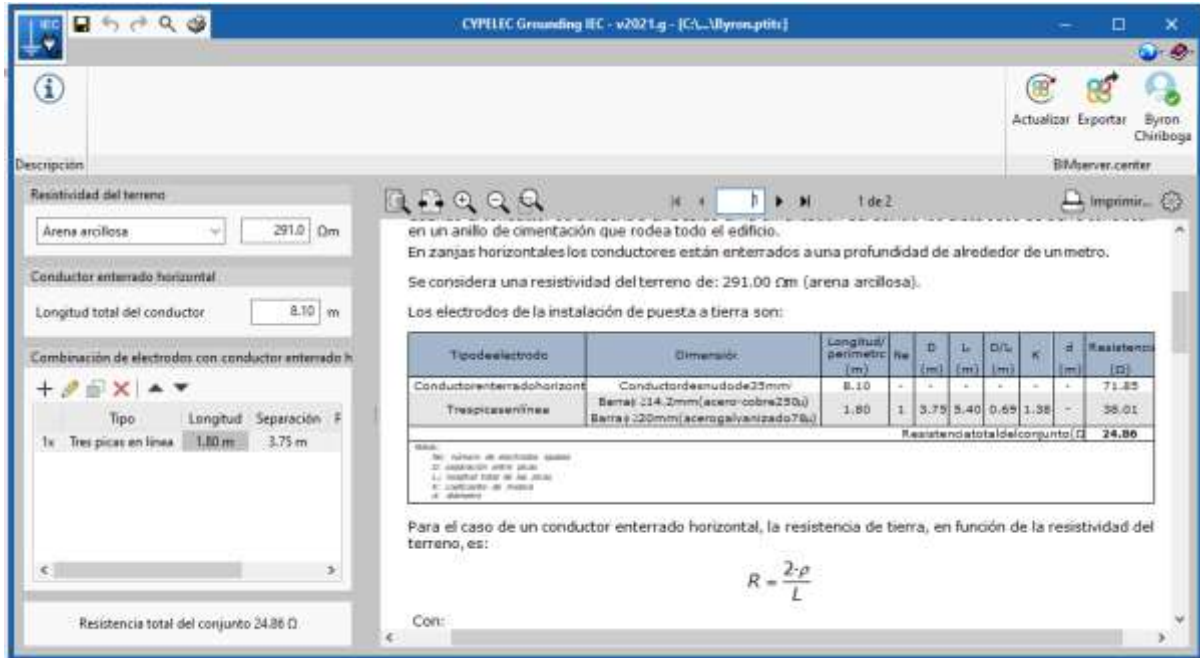
2.11.2.1 Procedimiento de cálculo

CYPELEC Grounding IEC permite calcular la resistencia de puesta a tierra de las instalaciones eléctricas en base a la norma IEC 60364-5-54. El programa está integrado en el flujo de trabajo Open BIM a través de la plataforma BIMserver.center. (CYPELEC, 2021). La Norma IEC 60364-5-54 aborda las instalaciones de puesta a tierra y los conductores de protección incluyendo los conductores de equipotencialidad a fin de satisfacer la seguridad de la instalación eléctrica. El valor de la resistencia de puesta a tierra se obtiene especificando la resistividad del terreno, la longitud total del conductor enterrado horizontal y las características de los electrodos de puesta a tierra definidos en la norma, pudiendo escoger entre:

- Pica vertical aislada
- Dos picas en línea
- Tres picas en línea
- Tres picas en triángulo
- Cuatro picas en línea
- Cuatro picas en cuadrado
- Placa enterrada vertical
- Pilar metálico

En la figura 34 se muestra la interfaz del programa en ella se ingresa los datos para el calculo de la resistencia aparente del suelo.

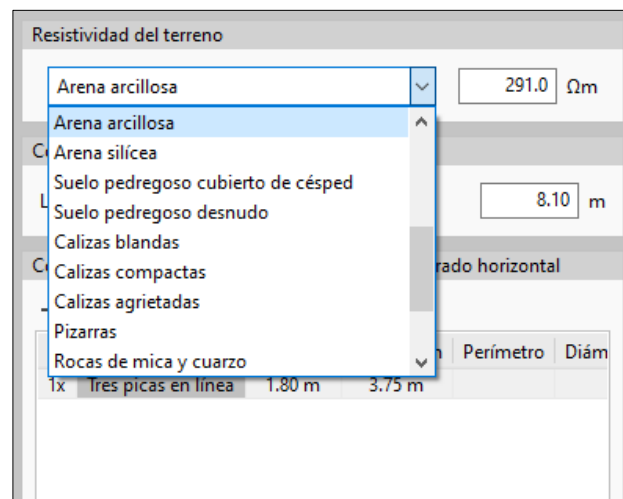
Figura 34: Interfaz de programa CYPELEC Grounding IEC



Fuente: (CYPELEC, 2021)

En la sección resistividad del terreno, se puede seleccionar el tipo de suelo y modificar el valor a nuestra conveniencia, el parámetro de la resistividad se obtiene mediante la ecuación del método de Wenner y las resistividades obtenidas por el programa IPI2WIN tal como se muestra en la figura 35. En la sección longitud total del conductor se ingresa la cantidad de conductor total en metros (longitud del conductor enterrado horizontalmente).

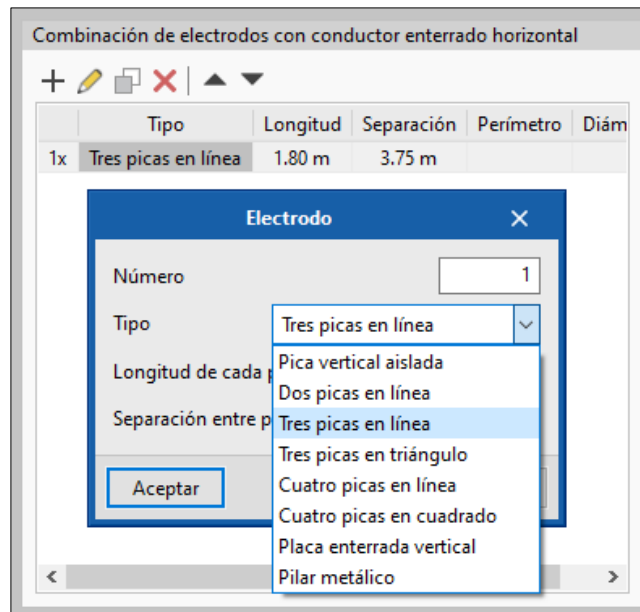
Figura 35: Resistividad del terreno ingreso de datos



Fuente: (CYPELEC, 2021)

En la sección combinación de electrodos con conductor enterrado horizontalmente, se elige la disposición del sistema de puesta a tierra (figura 36), además se ingresa los datos de longitud de separación entre picas y la longitud de la varilla en metros.

Figura 36: combinación de electrodos con conductor enterrado horizontalmente



Fuente: (CYPELEC, 2021)

El programa realiza los respectivos cálculos aprobados por la norma IEC 60364-5-54 e indica el valor de la resistencia aparente del suelo, es preciso mencionar que el valor de la resistencia de puesta tierra debe estar dentro de los parámetros establecidos por las normativas ecuatorianas.

2.12 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SOFTWARES PARA EL DISEÑO DE LA PUESTA A TIERRA.

Anteriormente se describieron las herramientas computacionales para los cálculos del diseño de la puesta a tierra. A continuación, se presentan las ventajas y desventajas de los programas para el cálculo de la resistividad y resistencia aparente de una puesta a tierra.

2.12.1 Cálculo de la resistividad del terreno

Después de determinar los softwares que se ajustan a las necesidades de esta investigación se presentan las ventajas y desventajas de los dos programas que determinan el parámetro de la resistividad aparente.

2.12.1.1 Software IPI2WIN

Ventajas

- IPI2Win está diseñado para la interpretación automática o semi-automática de datos de sondeo eléctrico vertical obtenidos con varios de los arreglos utilizados con más frecuencia en la prospección eléctrica.
- Su enfoque a la obtención de un resultado geológico en la característica que distingue a IPI2Win de otros programas populares de inversión automática.
- Debido a la variación de la solución dado por el criterio del interpretador es posible elegir, entre un juego de soluciones equivalentes, la que mayor se ajuste tanto a los datos geofísicos o geoelectrónicos que se necesiten.
- Posee licencia de uso libre.
- Puede ser instalado en cualquier computadora personal IBM compatible con sistema operativo Windows 95/98/NT/2000/XP/Vista/10.
- La utilización de su interfaz es intuitiva y fácil de usar.
- Permite determinar la resistividad del terreno en múltiples capas.

Desventajas

- No posee soporte técnico en caso de corrección de fallas del programa.
- No posee un sistema de actualización para nuevas versiones del programa ni corrección de errores.

2.12.1.2 Software Re2cap

Ventajas

- El programa puede calcular el modelo del suelo para sondeos eléctricos Wenner y Schlumberger contemplando el uso de dos capas el cual es sugerido por la IEEE 81

de 1983.

- El programa es un software gratuito y puede ser utilizado para estimar el modelo del suelo en dos capas y ser usados en posteriores diseños de malla de puesta a tierra.
- La interfaz del programa es sencilla y fácil de usar.
- Permite la interpretación de hasta ocho perfiles de medición.
- Posee actualizaciones a nuevas versiones

Desventajas

- Determina únicamente la interpretación de la resistividad de la primera y segunda capa.
- No tiene un sistema de interpretación multicapa.
- No tiene un sistema de corrección de error para la curva de campo de la resistividad del terreno.

2.13 DETERMINACIÓN DEL SOFTWARE PARA EL DESARROLLO DE LA PROPUESTA

Para poder desarrollar la propuesta de la presente investigación y determinar el software se realizaron sondeos eléctricos en diferentes sectores de la ciudad de Ibarra provincia de Imbabura, dichos sondeos se presentan más adelante de esta explicación, para la adquisición de datos se aplicó el método recomendado (Wenner) y para la obtención de las mediciones se utilizó el Teluometro marca DT5300.

Para la interpretación de datos se utilizó el software IPI2WIN, debido a sus grandes ventajas que posee para la determinación de la resistividad aparente y para el cálculo de la resistencia teórica de la puesta a tierra, se aplicó la metodología de la norma IEC 60364-5-54 empleando el programa CYPELEC Grounding IEC, se usó este programa debido a que posee las características principales para esta investigación, como son la normativa y el acceso gratuito de la aplicación.

Se ejecutaron varios casos de estudio en campo indicados en la sección 2.14.1 hasta la

sección 2.14.4 de este documento, gracias a ello se obtuvieron medidas de resistividad del suelo de varios sectores, los datos tabulados de cada sector, fueron ingresados en el programa IPI2WIN, el cual permitió obtener el modelo del suelo en dos capas y mediante un software CYPELEC Grounding IEC se procedió a determinar la resistencia aparente de una varilla de cobre que se instaló en dicho suelo.

También se realizó un caso de estudio en el ámbito técnico, en el cual se aplicó el método propuesto para obtener la resistencia aparente del terreno antes de la ejecución de un proyecto eléctrico, una vez concluido el sondeo eléctrico, se procedió a realizar la instalación del sistema de puesta a tierra conjuntamente con la instalación del transformador de distribución, una vez concluida la instalación del sistema de puesta a tierra se procedió a medir la resistencia de las varillas copperweld, luego se realizó el análisis de los datos, usando el software computacional y los datos tomados en campo. Mediante este procedimiento se evidenció una diferencia entre realizarlo manualmente y a través del software, por ende, haciendo uso de un software computacional se obtienen los datos con mayor rapidez y confiabilidad.

Cuando se utiliza el software computacional IPI2WIN para determinar la resistividad del suelo, se debe utilizar un software adicional, debido a que el programa solamente permite modelar el suelo en varias capas, para la determinación de la resistencia aparente del sistema se sugiere utilizar el programa CYPELEC Grounding IEC.

Para verificar la efectividad de los programas computacionales, se determinó la resistividad del suelo en varios sectores de la ciudad de Ibarra y se comprobó la medición de la resistencia de las varillas copperweld instaladas intencionalmente con el fin de comprobar la validez de esta metodología. A continuación, se describen los diferentes casos de estudio siendo los siguientes:

2.13.1 Estudio 1.- Toma de datos del suelo en el sector La Victoria. (Sector 1)

En la figura 37 se puede apreciar la toma de datos en campo, el lugar se encuentra ubicado en el sector La Victoria en la ciudad de Ibarra, el terreno elegido para este caso de estudio se realizó en un parterre vial en la Av. Jorge Guzmán Rueda y Eduardo Garzón Fonseca, para la obtención de datos de la resistividad del suelo se utilizó el método de Wenner.

Figura 37:Obtención de datos en campo método de Wenner caso de estudio 1



Fuente: Autor

Los datos obtenidos fueron los siguientes:

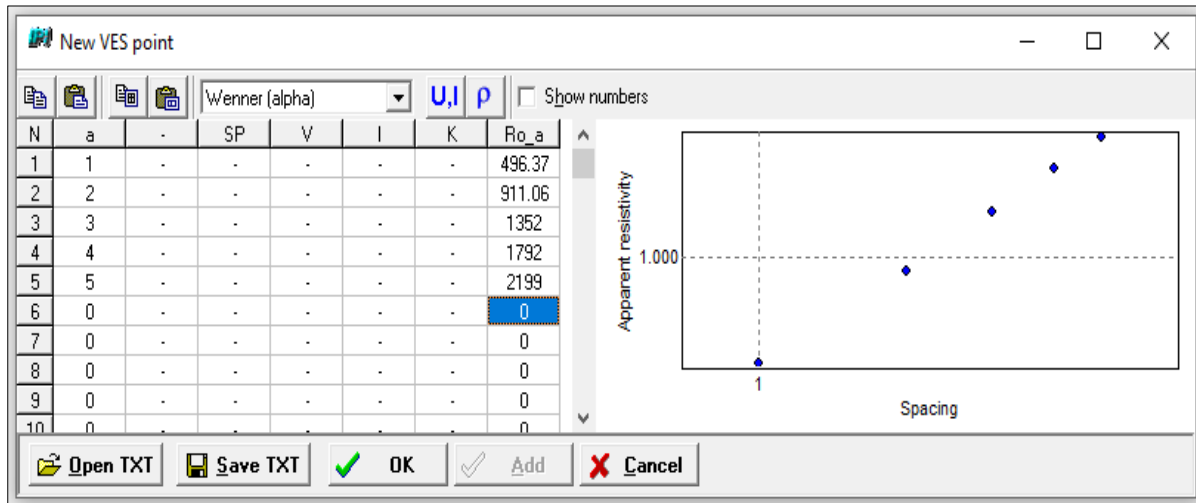
Tabla 9:Datos tabulados caso de estudio 1

Nro. de medición	Distancia entre electrodos (a)	Resistencia en Ohms obtenida del Teluometro	Resistividad del terreno ($\rho = 2 \pi aR$)
1	1	79	496,37
2	2	72,5	911,06
3	3	71,7	1351,51
4	4	71,3	1791,96
5	5	70	2199,11

Fuente: Autor

Los valores de la resistividad del terreno calculados mediante el método de Wenner se ingresaron en el IPI2WIN, el programa determinó automáticamente la curva de campo y el modelo en dos capas. En la Figura 38 se puede apreciar los valores ingresados, luego se seleccionó el método de adquisición de datos (Wenner alfa), en la casilla de la columna (a) se ingresó las distancias entre electrodos y la Ro_a, se introdujo la resistividad calculada anteriormente en la tabla 9.

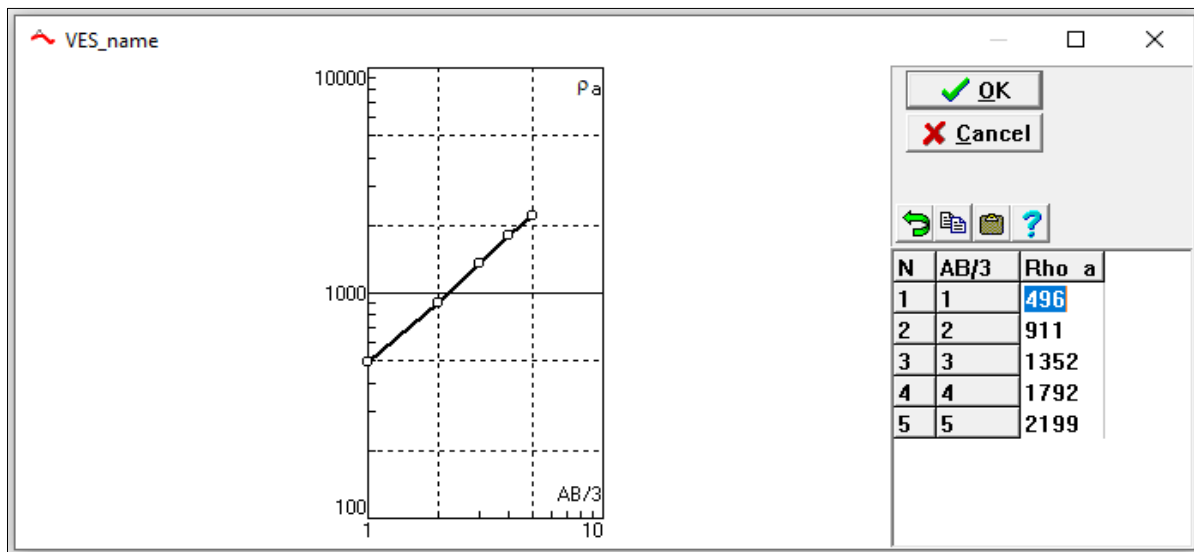
Figura 38: Datos ingresados caso de estudio 1



Fuente: Autor

Una vez ingresados los datos se visualiza la curva de campo oprimiendo la tecla F4, en la figura 39 se muestra la curva de campo del primer caso de estudio.

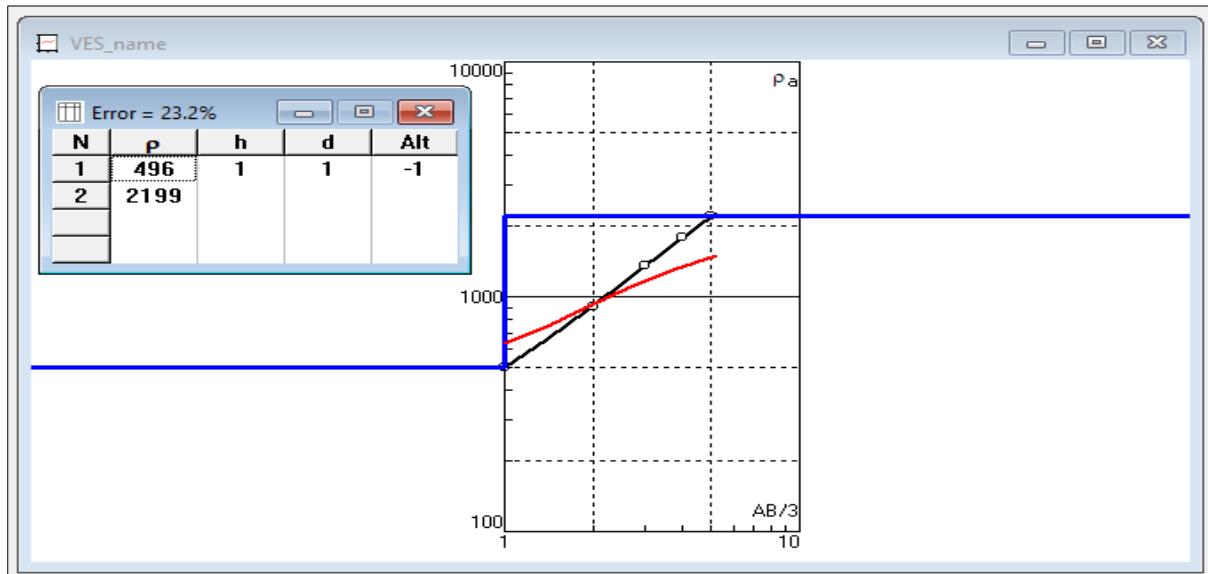
Figura 39: Datos ingresados caso de estudio 1



Fuente: Autor

En la figura 40 se observa el primer modelo que determina el programa el cual tiene un porcentaje de 23.2% de error.

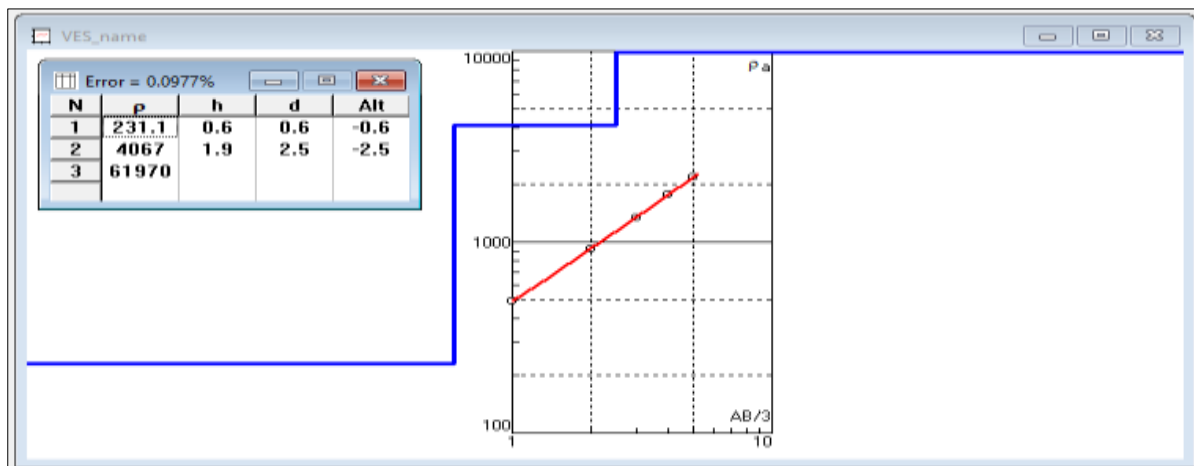
Figura 40: Modelación del Suelo caso de estudio 1 con el IPI2WIN



Fuente Autor

Se realizó el ajuste mediante el programa para obtener un mejor modelo con un porcentaje menor de error, se realizó esta operación tal como se observa en la figura 41, la cual indica el nuevo modelo determinado por el software:

Figura 41: Nuevo modelo determinado por el programa caso de estudio 1



Fuente: Autor

El ajuste que realizó el programa automáticamente se usó para el cálculo de la resistividad aparente, como se puede observar en la figura 38 indica un porcentaje aceptable para el diseño del sistema de puesta a tierra; este modelo obtenido se redujo mediante la fórmula de Hummel a una de dos capas a fin de obtener la resistividad total del terreno, la reducción de capas se calculó mediante la ecuación 7 tal como se demuestra a continuación:

$$\rho\alpha = \frac{L_1 + L_2}{\frac{L_1}{\rho_1} + \frac{L_2}{\rho_2}}$$

Remplazando los valores tenemos:

$$\rho\alpha = \frac{0.6 + 1.9}{\frac{0.6}{231.9} + \frac{1.9}{4067}} = 818.47 \Omega \cdot m$$

Para el cálculo del espesor:

$$d_{eq} = d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n = \sum_{i=1}^n d_t$$

Reemplazando valores:

$$d_{eq} = 0.6 + 1.9 = 2.5 \text{ m}$$

El resultado de la reducción de la resistividad del terreno obtenido fue de 818.47 $\Omega \cdot m$, el cual cuenta con un espesor de 2.5 m. Para obtener la resistencia aparente del sistema de puesta a tierra se despejó de la ecuación del método de Wenner Alfa, tal como se indicó en la figura 5 del primer capítulo.

$$\rho = 2 * \pi * a * R \quad ; \quad R = \frac{\rho}{2\pi * a}$$

$$R = \frac{818.47}{2\pi * 2.5} = 52.11 \Omega$$

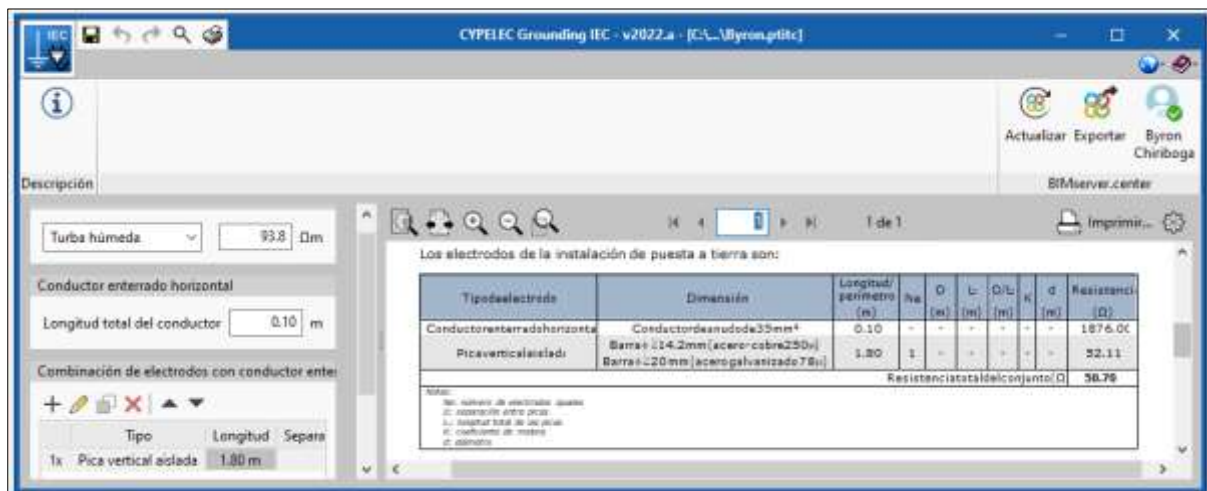
Se calculó la resistividad del terreno despejando de la fórmula determinada por la IEC:

$$\rho = R * L$$

$$\rho = 52.11 * 1.8 = 93.798 \Omega m$$

Obtenido este parámetro y mediante el software CYPELEC Grounding IEC, se determinó la resistencia aparente del sistema de puesta a tierra; en la figura 42 se muestra el cálculo que realizó el programa.

Figura 42: Cálculo teórico de la resistencia aparente del suelo caso de estudio 1



Fuente: Autor

Como se observa en la figura 42 se ingresó el parámetro de la resistividad aparente, luego se seleccionó el tipo de suelo y se consideró la longitud total del conductor de 0.10 m para el cálculo de una varilla proyectada a instalarse en ese lugar, el resultado total obtenido mediante el programa fue de 50.70 Ω de resistencia, sin embargo, se consideró el valor de 52.11 Ω para el cálculo de solo la varilla para el diseño. El valor de resistencia aparente obtenido se procedió a la verificación en campo a través del uso del Telurómetro marca CEM modelo DT-5300. La medición de una varilla copperweld de 1,80 metros enterrada en el suelo de estudio indicó una lectura de 55.9 Ω (Véase figura 43).

Figura 43: Resistencia de varilla instalada caso estudio 1



Fuente: Autor

2.13.2 Estudio 2.- Toma de datos del suelo en el sector La Victoria. (Sector 2)

La figura 44 indica el lugar del segundo caso de estudio ubicado en la calle Alfredo Albuja Galindo sector La Victoria en la ciudad de Ibarra, para la obtención de datos de la resistividad del suelo se utilizó el método de Wenner, la condición del terreno fue parcialmente húmeda debido al clima lluvioso.

Figura 44: Obtención de datos en campo caso de estudio 2



Fuente: Google Maps

Los datos obtenidos fueron los siguientes:

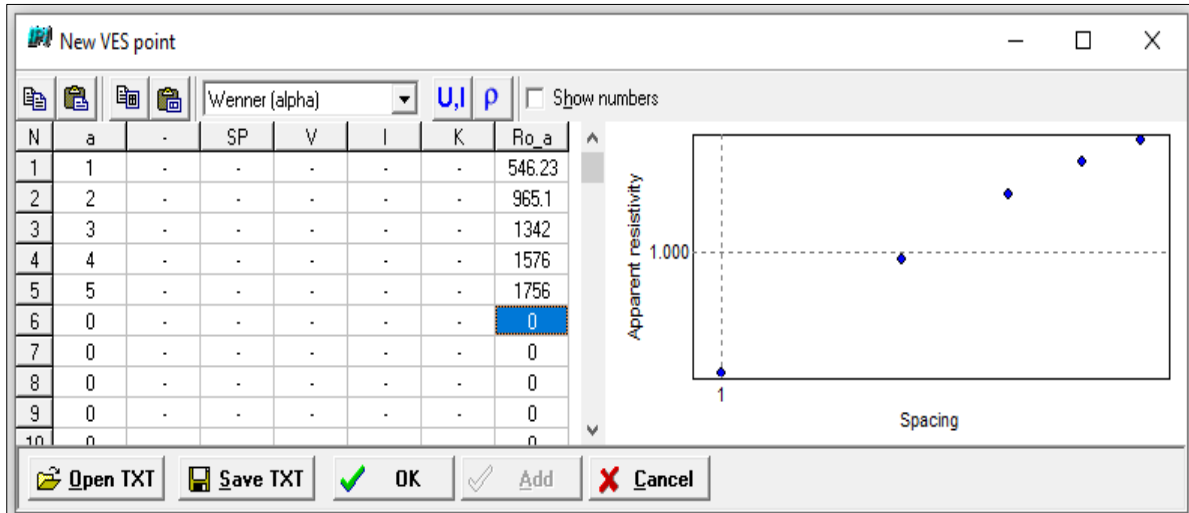
Tabla 10: Datos tabulados caso de estudio 2

Nro. de medición	Distancia entre electrodos (a)	Resistencia en Ohms obtenida del Teluometro	Resistividad del terreno ($\rho = 2\pi aR$)
1	1	89,8	564,23
2	2	76,8	965,10
3	3	71,2	1342,09
4	4	62,7	1575,82
5	5	55,9	1756,15

Fuente: Autor

En la Figura 45 se puede apreciar los datos introducidos se seleccionó el método de adquisición de datos (Wenner alfa).

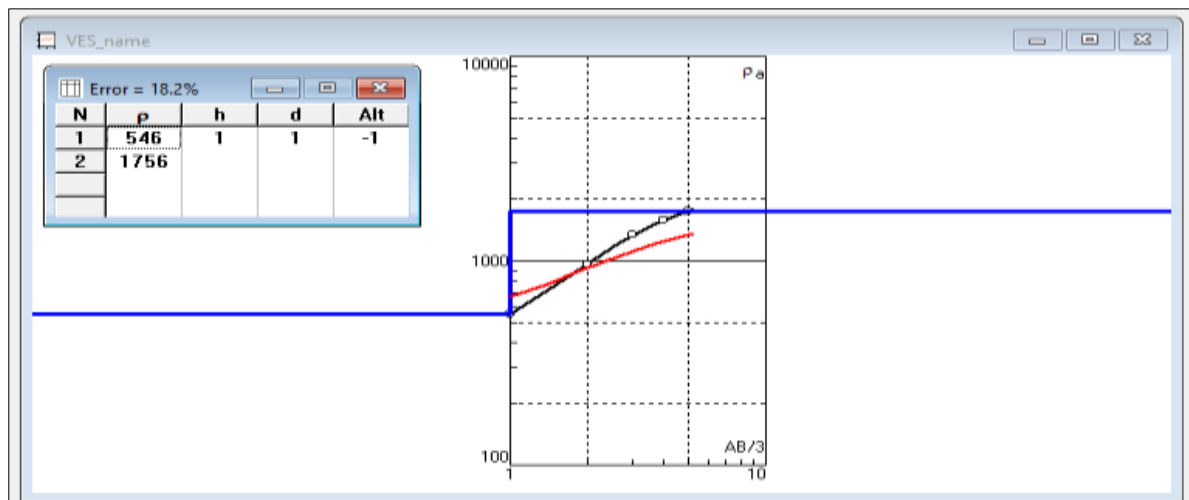
Figura 45: Datos ingresados caso de estudio 2



Fuente: Autor

En la figura 46 se observa el primer modelo que determina el programa el cual tiene un porcentaje de 18.2% de error.

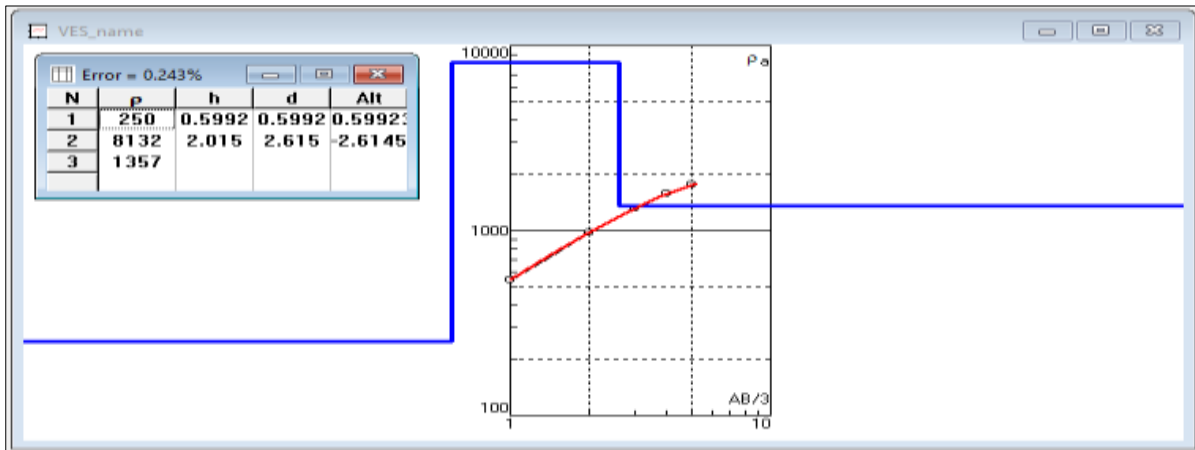
Figura 46: Modelación del Suelo caso 2 con el IPI2WIN



Fuente Autor

Se realizó el ajuste para determinar un mejor modelo con un porcentaje menor de error, en la figura 47 se muestra el nuevo modelo determinado por el software:

Figura 47: Nuevo modelo determinado por el programa estudio 2



Fuente: Autor

Mediante este modelo se calculó la resistividad total mediante la fórmula de Hummel, la reducción de capas se la realizó mediante la ecuación 7:

Reemplazando los valores se obtuvo:

$$\rho\alpha = \frac{0.5992 + 2.015}{\frac{0.5992}{250} + \frac{2.015}{8132}} = 988.51 \Omega \cdot m$$

Cálculo del espesor equivalente del terreno:

$$d_{eq} = 0.5992 + 2.015 = 2.61 \text{ m}$$

El resultado de la reducción de la resistividad del terreno obtenido fue de 988.51 $\Omega \cdot m$, el cual cuenta con un espesor de 2.61 m. Para obtener la resistencia aparente del sistema de puesta a tierra se despejó de la ecuación del método de Wenner Alfa, tal como se indicó en la figura 5 del primer capítulo.

$$\rho = 2 * \pi * a * R \quad ; \quad R = \frac{\rho}{2\pi * a}$$

$$R = \frac{988.51}{2\pi * 2.61} = 60.28 \Omega$$

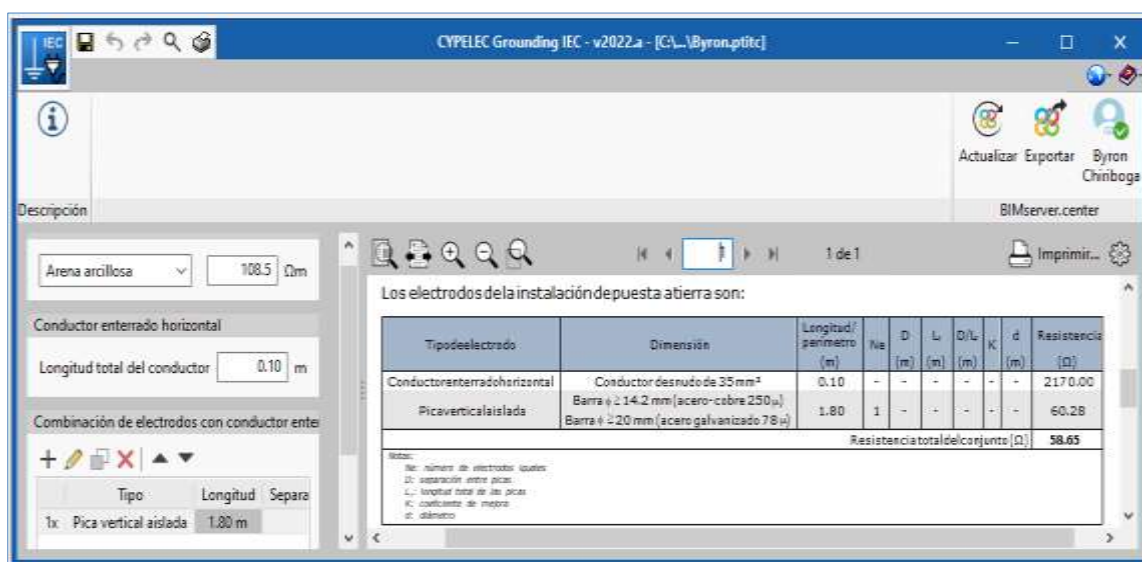
Se calculó la resistividad del terreno despejando de la formula determinada por la IEC:

$$\rho = R * L$$

$$\rho = 60.28 * 1.8 = 108.51 \Omega m$$

Obtenido este parámetro y mediante el software CYPELEC Grounding IEC, se calculó la resistividad aparente del terreno tal como se indica en la figura 48.

Figura 48: Cálculo teórico de la resistencia aparente del suelo caso de estudio



Fuente: Autor

Como se observa en la figura 48 se ingresó el parámetro de la resistividad aparente, luego se seleccionó el tipo de suelo y se consideró la longitud total del conductor de 0.10 m para el cálculo de una varilla proyectada a instalarse en ese lugar, el resultado total obtenido mediante el programa fue de 58.65 Ω de resistencia, sin embargo, se consideró el valor de 60.28 Ω para el cálculo de solo la varilla para el diseño. El valor de resistencia aparente obtenido se procedió a la verificación en campo a través del uso del Telurómetro. La medición de una varilla copperweld de 1,80 metros enterrada indicó una lectura de 62.7 Ω (Véase figura 49).

Figura 49: Resistencia de varilla instalada caso estudio 2



Fuente: Autor

2.13.3 Estudio 3.- Toma de datos del suelo en el sector Vivienda Popular 1. (Sector 1)

En la figura 50 se puede apreciar la obtención de datos en campo, el lugar se encuentra ubicado en las calles C-W y C-27 sector Vivienda Popular 1 en la ciudad de Ibarra, para la adquisición de datos del terreno se utilizó el método de Wenner.

Figura 50: Obtención de datos en campo método de Wenner caso de estudio 3



Fuente: Autor

Los datos obtenidos fueron los siguientes:

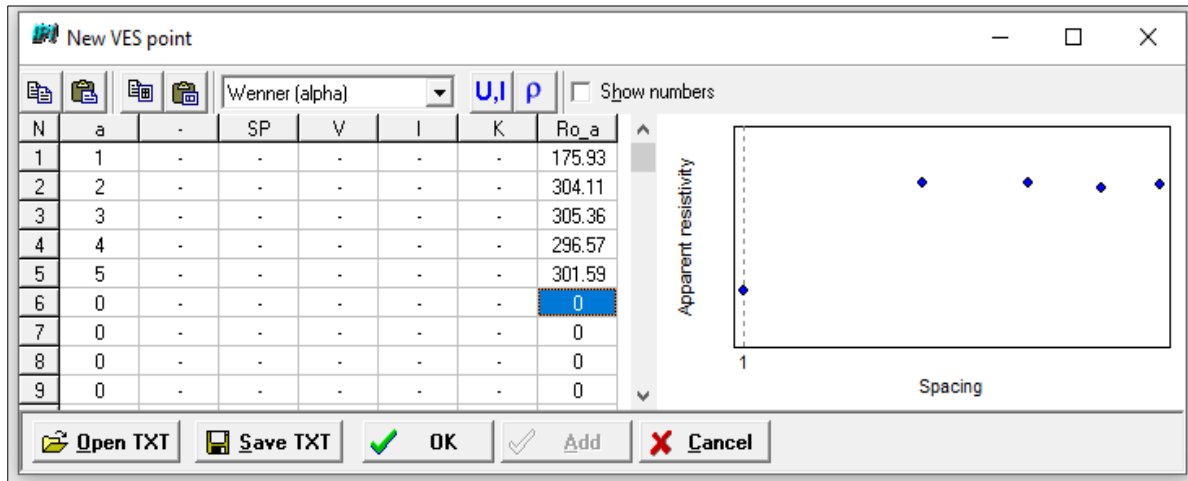
Tabla 11: Datos tabulados caso de estudio 3

Nro. de medición	Distancia entre electrodos (a)	Resistencia en Ohms obtenida del Teluometro	Resistividad del terreno ($\rho = 2 \pi aR$)
1	1	28	175,93
2	2	24,2	304,11
3	3	16,2	305,36
4	4	11,8	296,57
5	5	9,6	301,59

Fuente: Autor

En la Figura 51 se puede apreciar los datos ingresados y se seleccionó el método de adquisición de datos (Wenner alfa).

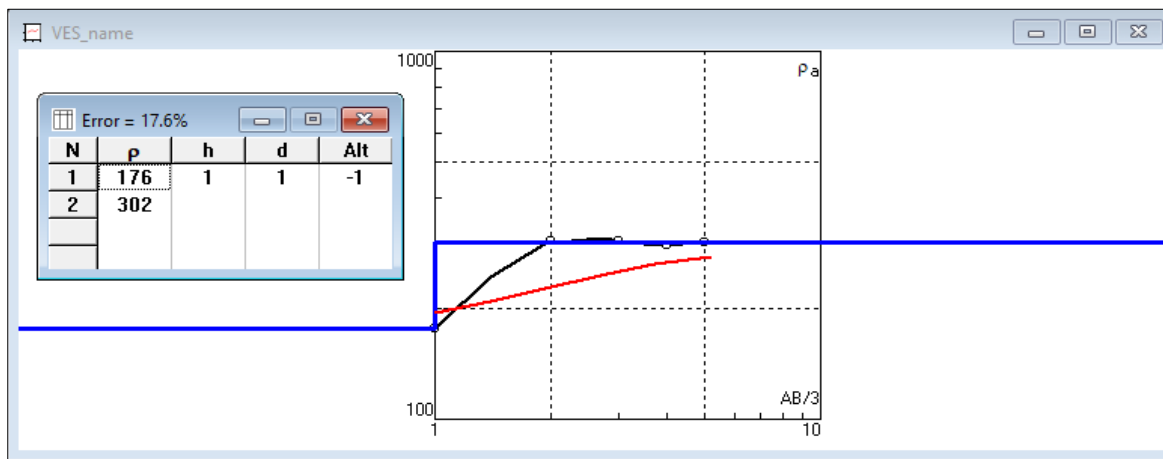
Figura 51: Datos ingresados caso de estudio 3



Fuente: Autor

En la figura 52 se observa el primer modelo que determina el programa el cual tiene 17.6 % de error, es un valor con porcentaje muy elevado, consecuentemente se procedió a realizar el ajuste, en la gráfica de la resistividad vs espaciamento se aprecia que la curva de la resistividad tiende a tomar una línea recta, esto indica que el terreno es uniforme a medida que se realizó las mediciones.

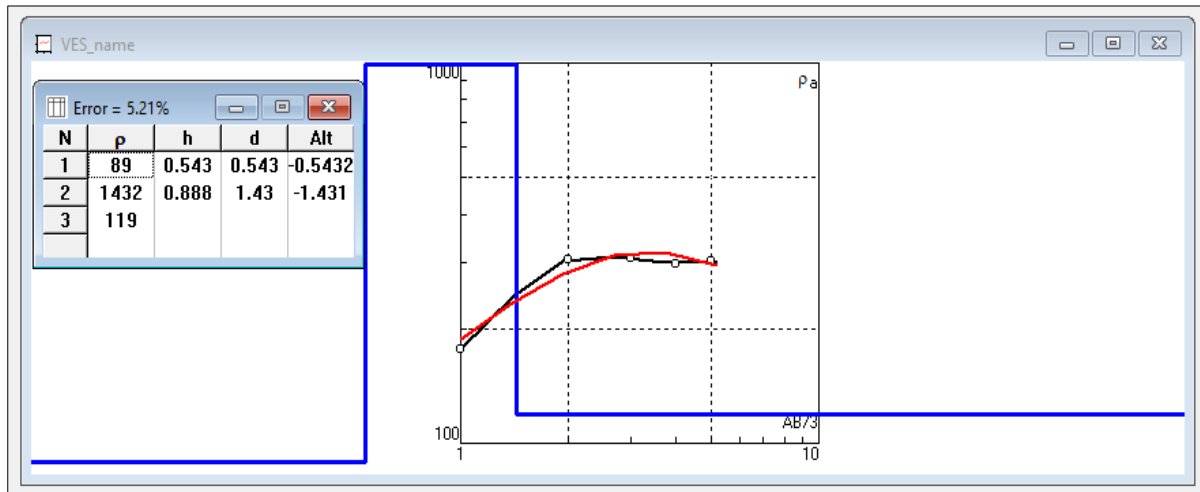
Figura 52: Modelación del Suelo caso 3 con el IPI2WIN



Fuente Autor

Se realizó el ajuste para determinar un mejor modelo con un porcentaje menor de error, en la figura 53 se muestra el nuevo modelo determinado por el software:

Figura 53: Nuevo modelo en dos capas determinado por el programa caso de estudio 3



Fuente: Autor

Mediante este modelo se redujo mediante la fórmula de Hummel a fin de obtener la resistividad total del terreno, la reducción de capas se la realizo mediante la ecuación 7:

Remplazando los valores se obtuvo:

$$\rho\alpha = \frac{0.543 + 0.888}{\frac{0.5992}{89} + \frac{0.888}{1432}} = 212.91 \Omega \cdot m$$

Para el cálculo del espesor:

$$d_{eq} = 0.543 + 0.888 = 1.431 \text{ m}$$

El resultado de la reducción de la resistividad del terreno se obtuvo 212.91 $\Omega \cdot m$, el cual es el parámetro de resistividad aparente del terreno por método de Wenner y con un espesor de 2.5 m. Se obtuvo la resistencia aparente del terreno despejando de la ecuación:

$$\rho = 2 * \pi * a * R \quad ; \quad R = \frac{\rho}{2\pi * a}$$

$$R = \frac{212.91}{2\pi * 1.431} = 23.68 \Omega$$

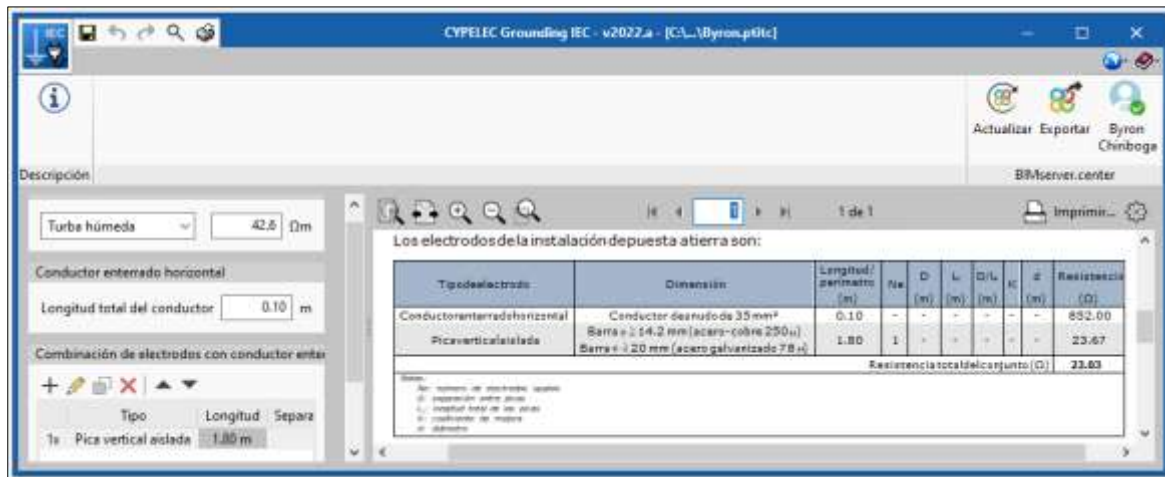
Se calculó la resistividad despejando de la formula determinada por la IEC:

$$\rho = R * L$$

$$\rho = 23.68 * 1.8 = 42.62 \Omega m$$

Obtenido este parámetro y mediante el software CYPELEC Grounding IEC, se determinó la resistividad aparente del terreno tal como se indica en la figura 54.

Figura 54: Cálculo teórico de la resistencia aparente del suelo caso de estudio 3



Fuente: Autor

Como se observa en la figura 54 se ingresó el parámetro de la resistividad aparente, luego se seleccionó el tipo de suelo y se consideró la longitud total del conductor de 0.10 m para el cálculo de una varilla proyectada a instalarse en ese lugar, el resultado total obtenido mediante el programa fue de 23.03 Ω de resistencia, sin embargo, se consideró el valor de 23.67 Ω para el cálculo de solo la varilla para el diseño. El valor de resistencia aparente obtenido se procedió a la verificación en campo a través del uso del Telurómetro. La medición de una varilla copperweld de 1,80 metros enterrada en el terreno indicó una lectura de 23.8 Ω (Véase figura 55).

Figura 55: Resistencia de varilla instalada caso estudio 3



Fuente: Autor

2.13.4 Estudio 4.- Toma de datos del suelo en el sector Vivienda Popular 1. (Sector 2)

En la figura 56 se puede apreciar la obtención de datos en campo, el lugar se encuentra ubicado en las calles C-W y C-26 sector Vivienda Popular 1 en la ciudad de Ibarra, para la adquisición de datos de la resistividad del suelo se utilizó el método de Wenner.

Figura 56: Obtención de datos en campo método de Wenner caso de estudio 4



Fuente: Autor

Los datos obtenidos fueron los siguientes:

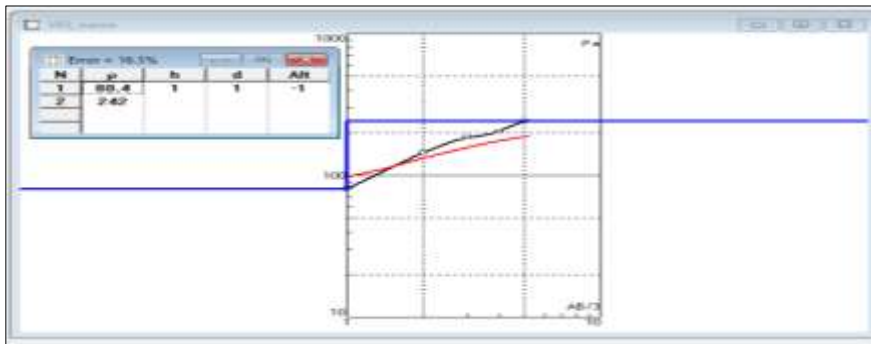
Tabla 12: Datos tabulados caso de estudio 4

Nro. de medición	Distancia entre electrodos (a)	Resistencia en Ohms obtenida del Teluometro	Resistividad del terreno ($\rho = 2 \pi aR$)
1	1	12,8	80,42
2	2	11,5	144,51
3	3	9,9	186,61
4	4	8,1	203,58
5	5	7,7	241,90

Fuente: Autor

En la figura 57 se observa que el primer modelo que determinó el programa con un 16.3 % de error, consecuentemente procedió a realizar el ajuste.

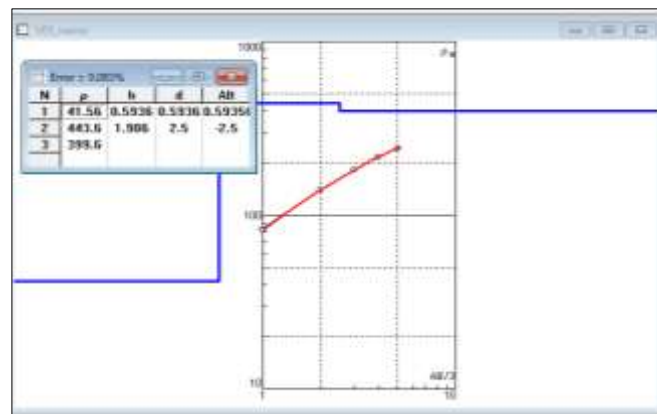
Figura 57: Modelación del Suelo caso 4 con el IPI2WIN



Fuente Autor

Se realizó el ajuste para determinar un mejor modelo con un porcentaje menor de error, en la figura 58 se muestra el nuevo modelo determinado por el software:

Figura 58: Nuevo modelo en dos capas determinado por el programa caso de estudio 4



Fuente: Autor

Mediante este modelo se obtuvo resistividad total del terreno empleando la fórmula de Hummel, la reducción de capas se la realizó mediante la ecuación 7 el cálculo se muestra a continuación:

Reemplazando los valores se obtuvo:

$$\rho\alpha = \frac{0.5936 + 1.906}{\frac{0.5936}{41.56} + \frac{1.906}{443.6}} = 134.53 \Omega \cdot m$$

Calculo de espesor:

$$d_{eq} = 0.5936 + 1.906 = 2.49 \text{ m}$$

Se obtuvo 134.53 $\Omega \cdot m$ de resistividad aparente del terreno por el método de Wenner y con un espesor de 2.49 m. La resistencia aparente del terreno se despejó de la ecuación:

$$\rho = 2 * \pi * a * R \quad ; \quad R = \frac{\rho}{2\pi * a}$$

$$R = \frac{134.53}{2\pi * 2.49} = 8.59 \Omega$$

Se calculó la resistividad del terreno despejando de la fórmula determinada por la IEC:

$$\rho = R * L$$

$$\rho = 8.59 * 1.8 = 15.46 \Omega m$$

Obtenido este parámetro y mediante el software CYPELEC Grounding IEC, se determinó la resistencia aparente del suelo tal como se indica en la figura 59.

Figura 59: Cálculo teórico de la resistencia aparente del suelo caso de estudio 4



Fuente: Autor

Como se observa en la figura 59 se ingresó el parámetro de la resistividad aparente, luego se seleccionó el tipo de suelo y se consideró la longitud total del conductor de 0.10 m para el cálculo de una varilla proyectada a instalarse en ese lugar, el resultado total obtenido mediante el programa fue de 8.38 Ω de resistencia, sin embargo, se consideró el valor de 8.61 Ω para el cálculo de solo la varilla para el diseño. El valor de resistencia aparente obtenido se procedió a la verificación en campo a través del uso del Telurómetro. La medición de una varilla copperweld de 1,80 metros enterrada indicó una lectura de 8.7 Ω (Véase figura 60).

Figura 60: Resistencia de varilla instalada caso estudio 3

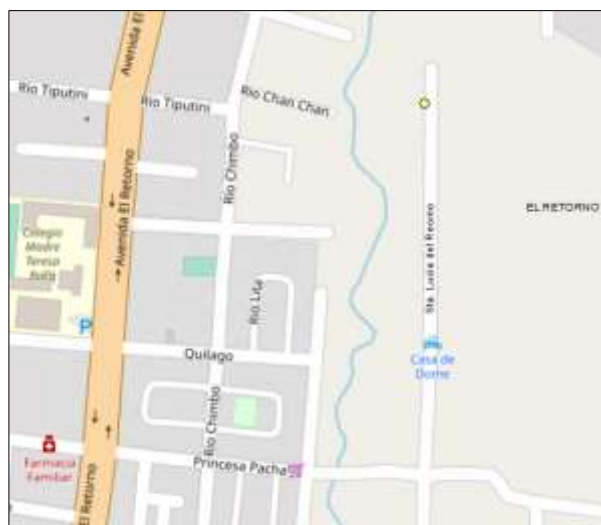


Fuente: Autor

2.14 APLICACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO EN EL ÁMBITO TÉCNICO

En la figura 61 se observa el lugar de la ejecución del proyecto eléctrico, el trabajo consistió en el montaje de un transformador monofásico de 15 Kva para un conjunto habitacional del sector El Retorno en la ciudad de Ibarra, el proyecto eléctrico se ejecutó en las calles Princesa Pacha y Sta. Lucia del Retorno, de acuerdo a la Base Geográfica de Emelnorte se realizó en el poste número 85725 con coordenadas x: 821057,21 ; y: 10036010,11. Para la obtención de datos de la resistividad del suelo se utilizó el método de Wenner, la condición del terreno fue normal y la condición ambiental fue soleado.

Figura 61: Ubicación proyecto eléctrico



Fuente: Base Arcgis OpenStreetMap (and) contributors, CC-BY-SA

En la figura 62 se puede apreciar la toma de datos en campo, la obtención de datos se realizó a 0.60 m de profundidad mediante el método de Wenner.

Figura 62: Obtención de datos en campo proyecto eléctrico



Fuente: Autor

Los datos tabulados se muestran a continuación:

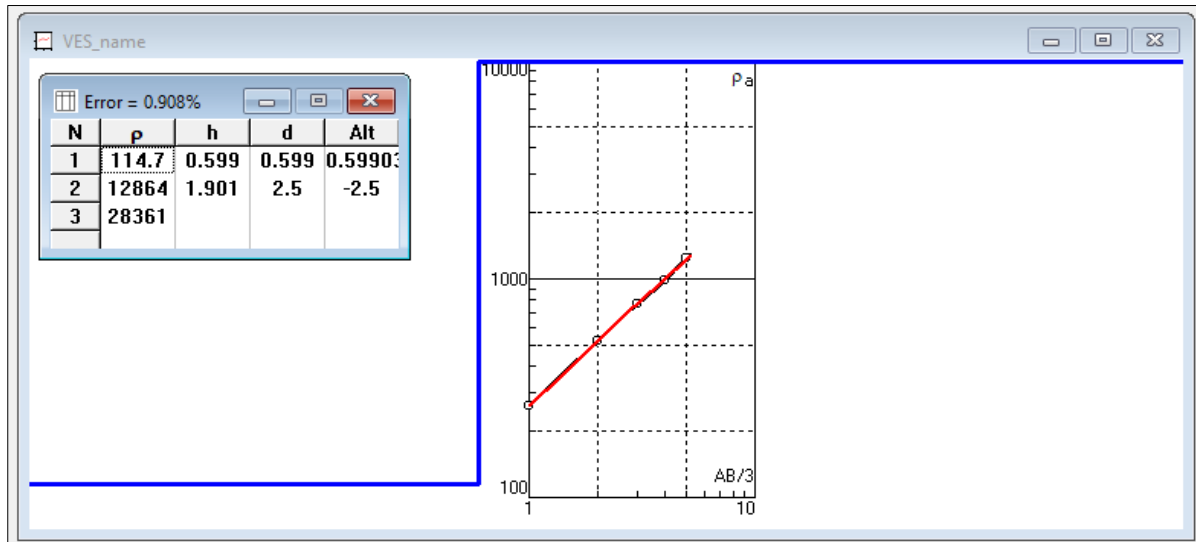
Tabla 13: Datos tabulados del proyecto eléctrico

Nro. de medición	Distancia entre electrodos (a)	Resistencia en Ohms obtenida del Teluometro	Resistividad del terreno ($\rho = 2 \pi aR$)
1	1	41,6	261,38
2	2	41,2	517,73
3	3	40,5	763,41
4	4	39,2	985,20
5	5	39,7	1247,21

Fuente: Autor

Los valores de la resistividad del terreno tabulados por el método de Wenner se introdujeron en el programa IPI2WIN y se realizó el ajuste para el programa determine un mejor modelo con un porcentaje menor de error, en la figura 63 se muestra el nuevo modelo determinado por el software:

Figura 63:Nuevo modelo en dos capas proyecto eléctrico



Fuente: Autor

Mediante este modelo se redujo mediante la fórmula de Hummel para de obtener la resistividad total del terreno, la reducción de capas se la realizó mediante la ecuación 7 tal como se muestra a continuación:

Reemplazando los valores se obtuvo:

$$\rho_a = \frac{0.599 + 1.901}{\frac{0.599}{114.43} + \frac{1.901}{12864}} = 464.48 \Omega.m$$

Calculo de espesor:

$$d_{eq} = 0.599 + 1.901 = 2.5m$$

Se obtuvo 464.48 Ω.m de resistividad aparente del terreno por el método de Wenner y con un espesor de 2.5 m. Se calculó la resistencia aparente despejando de la ecuación:

$$\rho = 2 * \pi * a * R \quad ; \quad R = \frac{\rho}{2\pi * a}$$

$$R = \frac{464.48}{2\pi * 2.5} = 29.57 \Omega$$

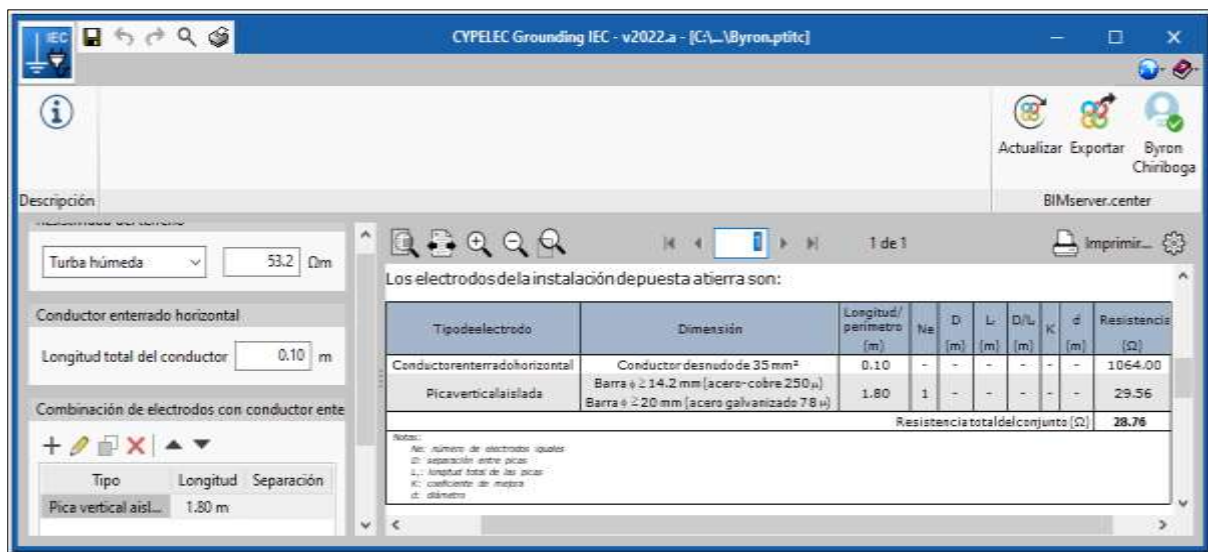
Se calculó la resistividad del terreno despejando de la fórmula determinada por la IEC:

$$\rho = R * L$$

$$\rho = 29.57 * 1.8 = 53.226 \Omega m$$

Obtenido este parámetro y mediante el software CYPELEC Grounding IEC, se determinó la resistividad aparente del terreno tal como se indica en la figura 64.

Figura 64: Cálculo teórico de la resistencia aparente proyecto eléctrico para una varilla instalada



Fuente: Autor

Como se observa en la figura 64 se ingresó el parámetro de la resistividad aparente, luego se seleccionó el tipo de suelo y se consideró la longitud total del conductor de 0.10 m para el cálculo de una varilla proyectada a instalarse en ese lugar, el resultado total obtenido mediante el programa fue de 28.76 Ω de resistencia, sin embargo, se consideró el valor de 29.56 Ω para el cálculo de solo la varilla para el diseño. El valor de resistencia aparente obtenido se procedió a la verificación en campo a través del uso del Telurómetro. La medición de una varilla copperweld de 1,80 metros enterrada indicó una lectura de 30.8 Ω (Véase figura 66).

Figura 65: Resistencia de una varilla instalada



Fuente: Autor

Como se observa en la figura 65 la resistencia de puesta a tierra de la varilla copperweld instalada no cumple con la normativa vigente debido a que el valor máximo permitido para construcciones de redes eléctricas aéreas es de 25 Ω, una vez que se determinó estos parámetros y obtenida la resistividad aparente también se realizó el cálculo mediante el programa CYPELEC Grounding IEC para la disposición 2 (T1 – 2) (2 Varillas enterradas verticalmente dispuestas en línea), en la figura 66 se muestra el cálculo teórico de la resistencia aparente para dos varillas en línea:

Figura 66: Cálculo teórico de la resistencia aparente proyecto eléctrico para dos varillas en línea

Los electrodos de la instalación de puesta a tierra son:

Tipo de electrodo	Dimensión	Longitud/ perímetro (m)	Ne	D (m)	L (m)	D/L	K	d (m)	Resistencia (Ω)
Conductor enterrado horizontal	Conductor de superficie 35mm ²	0.10	-	-	-	-	-	-	1064.00
Dos picas en línea	Barra ø=14.2mm (acero-cobre 250μ) Barra ø=20mm (acero galvanizado 78μ)	1.80	1	2.50	3.60	0.69	1.24	-	12.83
Resistencia total del conjunto (Ω)									12.68

Notas:
 Ne: número de electrodos iguales
 D: separación entre picas
 L: longitud total de las picas
 K: coeficiente de mejora
 d: diámetro

Fuente: Autor

Como se observa en la figura 66 se ingresó el parámetro de la resistividad aparente y se eligió el tipo de suelo, se ingresó la longitud total del conductor de 2.50 m que fue la separación entre varillas como resultado total obtenido mediante el programa fue de 12.68 Ω

de resistencia, sin embargo, se consideró el valor de 12.83Ω para el cálculo de dos picas en línea.

El valor obtenido con la ayuda del software se procedió a la verificación en campo mediante el Telurómetro. La medición obtenida por el equipo para la disposición 2 (T1 – 2) (2 Varillas enterradas verticalmente dispuestas en línea) instalada en el terreno indicó una lectura de 13.2Ω mediante este procedimiento se determinó que es una lectura aproximada al valor calculado (véase figura 67).

Figura 67: Resistencia de disposición dos varillas instaladas en línea



Fuente: Autor

2.15 COMPARACIÓN DE RESULTADOS TEÓRICOS CON LAS MEDICIONES EN CAMPO

En la tabla 14 se muestra la comparación de resultados de la resistencia de puesta a tierra entre los datos obtenidos por el software computacional y los datos medidos en campo, en la tabla se puede apreciar la diferencia y el porcentaje de error entre el cálculo de la resistencia teórica y la medida, la tabla indica el porcentaje de error de cada uno de los casos de estudio, en ella se puede observar que en algunos casos el margen de error es del uno por ciento.

Tabla 14: Comparación de Resistencia de puesta a tierra teórica y medida

Caso de estudio	Nro. de varillas	Resistencia de puesta a tierra teórica en ohmios	Resistencia de puesta a tierra medida en campo en ohmios	Diferencia de error	Porcentaje de error
Estudios en Campo	1	52,11	55,9	3,79	7%
	1	60,28	62,7	2,42	4%
	1	23,68	23,8	0,12	1%
	1	8,61	8,7	0,09	1%
Aplicación en el Ámbito Técnico					
Proyecto Eléctrico	1	29,57	30,8	1,23	4%
	2	12,83	13,2	0,37	3%
Total promedio de error					3%

Fuente: Autor

Una vez ejecutados los casos de estudio se validó la metodología aplicada, en base a que, los resultados obtenidos mediante el software y los datos tabulados en campo de los sistemas de puesta a tierra presentan un margen de error del tres por ciento, con esto se determinó que es un error no significativo, debido a que el margen de error que presentan corresponde a diversos factores que influyen en la medición de la resistencia de puesta a tierra, como por ejemplo, condiciones ambientales, topografía del terreno, falsos contactos entre electrodos, entre otros, señalado esto se procedió a realizar la Guía para el diseño de puestas a tierra para los transformadores de distribución.

En resumen, en este capítulo se determinaron normas, métodos y procedimientos para el diseño de los sistemas de puesta a tierra, se consideró las normas establecidas por la IEEE STD 80, IEC 60364-5-54, los lineamientos establecidos por las distribuidoras de energía y el NEC Ecuatoriano, en la sección 2.4 se calculó el calibre recomendado de conductor de cobre para la instalación de sistemas de puesta a tierra en transformadores monofásicos y trifásicos, en la sección 2.9 (Disposición de las varillas copperweld determinadas por el NEC ecuatoriano) se realizaron cálculos matemáticos en los cuales se determinó las resistividades máximas permitidas por la normativa ecuatoriana en el diseño de puestas a tierra, se describió los diferentes métodos de mejoramiento del terreno, se indicó el equipo necesario para realizar sondeos eléctricos verticales y se analizó el software para el diseño del sistema de puesta a tierra, se determinó que el método propuesto para la obtención de datos en campo (Wenner) y el software computacional son de gran ayuda para realizar diseños de puestas a tierra en proyectos eléctricos para transformadores de distribución y cámaras eléctricas.

CAPÍTULO III

3 DESARROLLO DE LA PROPUESTA

En el presente capítulo se realiza la explicación y descripción del manual, se expone las metodologías, normativas utilizadas, se indica el contenido teórico del mismo y los aspectos más importantes con las que se distribuye el manual.

La guía está enfocada en la medición, análisis y mejoramiento del diseño de los sistemas de puesta a tierra de los transformadores de distribución y cámaras eléctricas que se desarrollan en los proyectos eléctricos presentados por los profesionales del sector eléctrico. Esta guía es aplicable en todas las instancias no solo a nivel local sino también se puede hacer uso a nivel nacional.

3.1 Composición estructural de la guía

Para la elaboración de la guía para el diseño de puestas a tierra de los transformadores de distribución y cámaras eléctricas mediante el uso de un software computacional se siguió la siguiente composición estructural.

- TABLA DE IDENTIFICACIÓN
- NOMBRE DEL PROCEDIMIENTO
- OBJETIVO
- ALCANCE
- NORMATIVAS
- TÉRMINOS Y DEFINICIONES
- MATERIALES, EQUIPOS Y SISTEMAS
- GENERALIDADES
- FASES DEL PROCEDIMIENTO
- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
- ANEXOS

A continuación, se describe uno a uno los puntos de la estructura del documento guía para la instalación de sistemas de puestas a tierra para transformadores de distribución.

3.1.1 TITULO

En este apartado se escribió el nombre de la guía que hizo referencia al objetivo general que busca lograr esta investigación.

3.1.2 OBJETIVOS

Se redactó los objetivos que persigue el documento de forma tal que cualquier persona que haga uso de este, le quede claro su utilidad. Los objetivos fueron concretos y redactados con un verbo en infinitivo.

3.1.3 ALCANCE

En esta sección se indicó para quién, personas o dependencias, es aplicable la presente guía, así como las actividades que abarca en forma general haciendo referencia a la actividad principal de la investigación.

3.1.4 NORMATIVAS

En ese apartado se describió todos aquellos reglamentos que se hace referencia la presente guía, estos deben cumplirse para llevar a cabo los procedimientos para el diseño de un sistema de puesta a tierra.

3.1.5 TÉRMINOS Y DEFINICIONES

En este apartado se escribieron todos aquellos términos importantes para el desarrollo de esta guía, el objetivo es que cualquier persona que lo lea pueda entenderlo. Estos tienen concordancia con los términos, definiciones y están ordenados alfabéticamente.

Ejemplo:

Sistema de Tierra: Comprende todas las instalaciones interconectadas de puesta a tierra en un área específica.

Electrodo a tierra. Conductor incrustado en la tierra que se usa para recoger la corriente a tierra o de disipación de la corriente de tierra en la tierra.

3.1.6 MATERIALES, EQUIPOS Y SISTEMAS

En este punto se enlistaron los materiales, equipos y sistemas requeridos para llevar a cabo las actividades descritas en la guía, el listado de materiales y equipos están detallados para que el trabajador que realice cada una de las actividades pueda desarrollarlas de la forma correcta y no incurra en error por utilizar un material o equipo que no corresponda.

Ejemplo:

Equipos de protección personal

El EPP o equipo de protección personal se debe hacer uso obligatorio para desempeñar cualquier actividad de construcción de redes eléctricas el equipo principal para la instalación de una puesta tierra tenemos:

- Casco
- Guantes de cuero
- Botas de seguridad dieléctricas y punta de acero
- Gafas de protección visual
- Uniforme de dotación

3.1.7 GENERALIDADES

En esta sección se detallaron los conceptos básicos y temas importantes para la comprensión del documento, así como también se describió las normativas, técnicas, métodos y procedimientos generales para el diseño de un sistema de puesta a tierra.

3.1.8 FASES DEL PROCEDIMIENTO

En este apartado se redactó en detalle cómo se lleva a cabo cada una de las actividades que componen los diferentes procedimientos para el diseño de un sistema de puesta a tierra, cada actividad se redactó en forma de orden, iniciando con un verbo presente indicativo en tercera persona.

Esta sección se dividió en tres fases:

3.1.8.1 Fase 1. Planificación y Preparación

Se realizó una lista de los procedimientos esenciales antes de la adquisición y recolección de datos en campo, entre ellos se enfoca la lectura de esta guía para la comprensión de los procedimientos.

3.1.8.2 Fase 2. Sondeo eléctrico en Campo

En esta fase se redactaron las consideraciones antes de iniciar la adquisición de datos ya en campo, así como también verificación de equipos, delimitar el área de trabajo, preparar hojas de registro entre otros.

3.1.8.3 Fase 3. Interpretación de datos recolectados

En esta etapa se describieron los procedimientos de utilización de los programas computacionales esenciales para la interpretación de datos de resistividad del suelo.

3.1.9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

En este apartado se enlista las referencias bibliográficas de donde se ha sacado la información para elaborar la guía, entre ellos las referencias bibliográficas de las normativas, métodos y procedimientos para el diseño de una puesta a tierra.

3.1.10 ANEXOS

En la sección Anexos se incluyeron aquellos aportes que agregan valor adicional y que no se pueden agregar en la guía.

En resumen, la guía está estructurada de tal manera que cualquier proyectista eléctrico siga las normativas, metodologías y procedimientos para el diseño de sistemas de puestas a tierra para transformadores de distribución mediante el uso de un software computacional, el punto principal de este procedimiento es determinar la resistividad aparente del terreno y la resistencia teórica de un sistema de puesta a tierra antes de su instalación, los resultados obtenidos mediante los casos de estudio realizados en esta investigación son más que satisfactorios debido a que el porcentaje de error promedio fue del tres por ciento en comparación con lo medido y ejecutado en campo, este parámetro indica que este procedimiento reúne las ventajas que se necesitan para determinar que el sistema de puesta a tierra está dentro de los parámetros establecidos por las normativas actuales, la guía con metodologías y procedimientos para el diseño de puestas a tierra de transformadores de distribución mediante software computacional se encuentra adjunta en el ANEXO.

CONCLUSIONES:

- En esta investigación, se describieron los distintos métodos de medición de suelos para realizar sondeos eléctricos que se utilizan en el diseño de puestas a tierra, se concluyó que para esta investigación el método de cuatro puntos (Wenner) es el método más viable para la adquisición de datos, debido a que los resultados son más precisos y más confiables en la interpretación de resultados.
- En la presente investigación se estableció el software para el diseño de los sistemas de puestas a tierra, lo más importante para determinar el software computacional fue que sea de uso libre o gratuito, debido a que, para este estudio fue accesible en internet sin ninguna restricción por derechos de autor, lo más difícil fue establecer un software que permita calcular a la vez los dos parámetros importantes, la resistividad del suelo y la resistencia teórica del sistema de puesta tierra, porque, en la web, no existe un programa de uso libre que determine juntamente estos dos parámetros importantes, por consiguiente, en esta investigación se empleó dos softwares uno para medir la resistividad del terreno y otro para el cálculo de la resistencia de puesta tierra.
- Se elaboró una guía para el diseño de los sistemas de puesta a tierra de los transformadores de distribución, lo más importante de este recurso es que será de gran apoyo para realizar el diseño de los sistemas de puesta a tierra en los proyectos eléctricos, debido a que, en la guía se registran parámetros de diseños y normativas aplicables para la construcción de sistemas de aterramiento.
- En este trabajo de investigación se determinó un modelo biestratificado para las puestas a tierra que se diseñan en transformadores de distribución y cámaras eléctricas mediante el uso de un software computacional, lo más importante fue que el modelo biestratificado o de dos capas tomado como referencia, proporcionó el modelo característico de resistividad aparente, este parámetro se ingresó en el software computacional y determinó la resistencia aparente del sistema, lo cual permitió comprobar si la puesta a tierra está o no dentro de los parámetros establecidos por la normativa ecuatoriana.

RECOMENDACIONES:

- Para obtener la resistividad aparente del terreno se recomienda utilizar el método de Wenner por su eficiencia para la recolección de datos, además es un método recomendado internacionalmente, no es necesario enterrar el electrodo a más de 30 cm y sus resultados son confiables.
- Se recomienda utilizar los niveles máximos permitidos de resistividad aparente del terreno presentados en la guía, para las disposiciones más utilizadas en instalación de puestas a tierra en transformadores de distribución y construcción de redes eléctricas aéreas.
- Es recomendable que el proyectista adquiera un software con prestaciones para cálculos y diseños más avanzados, para poder realizar el cálculo apropiado del diseño de un sistema de puesta a tierra.
- Es necesario que las Empresas Distribuidoras de Energía exijan y concienticen a los profesionales presenten sus proyectos eléctricos utilizando herramientas computacionales.

BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, J., Iglesias, M., Jara, J. (2011). *Medida de Resistividad de la resistividad del terreno*. Obtenido de Universidad de Chile: <https://bit.ly/2T4todL>
- Arias Velásquez, RM y Mejía Lara, JV. (2019). *Failures in overhead lines grounding system and a new improve in the IEEE and national standards*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.02.033>
- BERROSPI. (2013). *Elaboración de un programa para computador de dimensionamiento y cálculo de mallas de puesta a tierra basado en la norma IEEE 80-2000*. Obtenido de <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/2962>
- Casas, F. O. (2010). *Soporte de la seguridad eléctrica*. Obtenido de <https://toaz.info/doc-viewer>
- Coello, A. (2021). *LA GESTIÓN DE LOS PROCESOS*. Obtenido de <https://webs.ucm.es/centros/cont/descargas/documento10142.pdf>
- COMPRAS P. (2020). *ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE MATERIALES POSTES*. Obtenido de <https://bit.ly/3iDCitv>
- Consuelo, B. O. (2021). *LAS TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN (T.I.C.)*. Obtenido de Universidad de Valencia: <https://www.uv.es/~bellochc/pdf/pwtic1.pdf>
- CYPELEC. (2021). *CYPELEC Grounding IEC.*. Obtenido de <http://cypelec-grounding-iec.cype.es/>
- Dehn & Söhne. (2007). *MANUAL DE PROTECCION CONTRA RAYOS*. Obtenido de <https://bit.ly/3zl55ZL>
- EEQUITO. (2014). *Normas para sistemas de distribución parte A*. Obtenido de <https://bit.ly/3cbrJd7>
- EEQUITO. (2014). *Normas para sistemas de distribución parte B*. Obtenido de <http://ftp.eeq.com.ec/upload/informacionPublica/2014/NormasparaSistemasdeDistribucionParteB.pdf>
- ELECTROCABLES. (2018). *Conductor de cobre desnudo. Sólidos y cableados*. Obtenido de <https://www.electrocable.com/uploads/product/conductores-de-cobre-conductores-de-cobre-desnudo.pdf>
- ELECTROCABLES. (2018). *Conductores Eléctricos, Cobre desnudo*. Obtenido de <https://www.electrocable.com/index.php/es/categorias-productos/construccion/cobre/cobre-desnudo.html>
- EPM. (2008). *MEDIDA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO*. Obtenido de NORMAS TÉCNICAS RA6-014: <https://bit.ly/3y4NYKT>
- ERICO. (2021). *ERICO GEM Calculator 3.1*. Obtenido de <https://erico-gem-calculator.software.informer.com/3.1/>

- ERICO. (2021). *nVent ERICO GEM. Material de Refuerzo de Tierra*. Obtenido de <https://www.erico.com/catalog/literature/E978B-LASP.pdf>
- Espinosa, A. P. (2014). *SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELECTRICAS*. Obtenido de UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA: <https://bit.ly/3tEXLnE>
- GEOSCAN. (2000). *IPI2Win, Guía de usuario*. Obtenido de http://geophys.geol.msu.ru/demo_exe/WIPI_OM2.PDF
- GEOSEISMIC. (2017). *MÉTODOS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA SEV TIPO WENNER Y SCHLUMBERGER*. Obtenido de <http://www.geoseismic.cl/metodos-resistividad-electrica-sev/>
- Gómez, C. G. (2008). *SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y PROTECCIÓN PARA*. Obtenido de Universidad de San Carlos de Guatemala: <https://bit.ly/3eE2YI9>
- Hamilton, A. (2006). *Manual De Políticas Y Procedimientos. Broadway, New York: NY 10019 U.S.A. Copyright. ISBN 0-86604-094-*
- IE2MMO. (2017). *Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra*. Obtenido de <https://ie2mmo.files.wordpress.com/2017/09/telu9.png>
- IEEE. (2000). *Std 80-2000 IEEE Guide for Safety in in AC Substation Grounding*. Obtenido de <https://bit.ly/2RPh8gv>
- IEEE. (2012). *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*. Obtenido de 10.1109 / IEEESTD.2012.6392181
- IEEE. (2015). *Std 80-2013 IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System*. Obtenido de <https://bit.ly/3fvyo2L>
- Ikastaroak. (2021). *Factores que influyen en la resistividad*. Obtenido de https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/IEI/IEI05/es_IEA_IEI05_Contenidos/website_411_factores_que_influyen_en_la_resistividad.html
- Industrial, M. (2021). *PROBADOR DE RESISTENCIA DE TIERRA DIGITAL INDUSTRIAL CEM DT-5300 OHM DC / AC VOLTÍMETRO*. Obtenido de https://cdn.shopify.com/s/files/1/1479/9364/products/000423_4_3_large.jpg?v=1473883456
- INEN. (2018). *INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN*. Obtenido de <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/CPE-19.pdf>
- INTELEC. (2017). *Intelec. Barras Químicas*. Obtenido de <http://www.intelecltda.cl/productos/quimica/index.html>
- JAGUA, J. (2021). *Suelo Resistividad Re2cap*. Obtenido de <https://sourceforge.net/projects/soil-resistivity-re2cap/>
- José Manuel Moreno-Maroto, Jacinto Alonso-Azcárate, Brendan C. O'Kelly,. (2021). *Review and critical examination of fine-grained soil classification systems based on plasticity*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105955>

- K. Prakash , A. Sridharan. (2012). *Clasificación de suelos no plásticos*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105955>
- KINDERMAN, G. (2010). *Aterramiento Eléctrico*. Perú: Geraldo Kindermann.
- KINDERMANN, G. (2020). *A-601 RESISTIVIDADE APARENTE DO SOLO PARA CALCULO DE ATERRAMENTO*. Obtenido de UNIVERSIDADE DA ELÉTRICA - IPT ENGENHARIA: <https://www.youtube.com/watch?v=Yp9-U-WdAx8>
- LOKE, M. H. (1999). *A practical guide to 2-D and 3-D surveys* . Obtenido de <https://pages.mtu.edu/~ctyoung/LOKENOTE.PDF>
- Manani, H. C. (Marzo de 2013). *Sistema de puesta a tierra y protección equipotencial para sistemas de cómputo*. Obtenido de Universidad Nacional del Centro del Perú: <https://bit.ly/3yeW4AW>
- MENDOZA, R. V. (2001). *CURSO BASICO MALLAS DE TIERRA CONCEPTOS FUNDAMENTALES*. Obtenido de <https://bit.ly/3uXMRKI>
- PEREZ, E. (2015). *Manual de aplicación de la norma IEEE Std 81 para líneas y subestaciones eléctricas de transmisión*.
- Perez, W., Serrano, C. & Surio, O. (2015). *Manual de aplicación de la norma IEEE Std 81 para líneas y subestaciones eléctricas de transmisión*. Obtenido de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/9008/1/Manual%20de%20aplicaci%C3%B3n%20de%20a%20norma%20IEEE%20Std%2081.pdf>
- SANZ A., JORGE HUMBERTO; DUQUE C., EDISON; GÓMEZ ESTRADA, SANTIAGO. (2010). *LA RESISTIVIDAD DEL SUELO EN FUNCION DE LA FRECUENCIA*. Obtenido de <https://bit.ly/3hci4Gi>
- SEBATELEC. (2021). *TRATAMIENTO DEL SUELO GEM 25A*. Obtenido de http://sebatelec.com/uploads/products/2019/01/ficha_1547844788_1547844791.pdf
- Vivanco, M. (2017). *LOS MANUALES DE PROCEDIMIENTOS COMO HERRAMIENTAS DE CONTROL INTERNO DE UNA ORGANIZACIÓN*. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202017000300038

ANEXO

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico

**GUÍA PARA EL DISEÑO DE PUESTAS A TIERRA DE LOS
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN Y CÁMARAS
ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO DE UN SOFTWARE
COMPUTACIONAL**

Código	Versión	Páginas
PG-SPT-CIMANELE-01	01	59
Elaborado por	Revisado por	Aprobado por
Byron Fernando Chiriboga Lugo	Msc. Isabel Quinde Msc. Johnny Barzola Msc. Ramiro Flores	Msc. Isabel Quinde Msc. Johnny Barzola Msc. Ramiro Flores
Fecha	Fecha	Fecha
25/10/2021	25/10/2021	25/10/2021

CONTENIDO

CONTENIDO.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
INTRODUCCIÓN.....	1
A. TÍTULO.....	1
B. OBJETIVOS.....	1
C. ALCANCE.....	1
D. NORMATIVAS APLICABLES.....	2
E. TÉRMINOS Y DEFINICIONES.....	2
F. EQUIPOS, MATERIALES Y HERRAMIENTAS.....	4
Equipos de protección personal.....	4
Medición de la resistividad del suelo.....	4
Materiales del sistema de puesta a tierra.....	4
Herramientas.....	5
G. GENERALIDADES.....	5
Resistividad del suelo o terreno.....	5
Técnicas para la medición de la resistividad del terreno.....	6
Método de variación de profundidad.....	6
Método de cuatro puntos.....	7
Método de Wenner.....	7
Arreglos del método de Wenner.....	8
Método de Schlumberger.....	8
Modelamiento del Suelo.....	9
Modelo suelo homogéneo.....	10
Modelo estratificado de suelo no homogéneo.....	10
Modelo de suelo de dos capas (Biestratificado).....	10
Modelo de suelo de dos capas por el método gráfico de Shunde.....	11

Métodos para la medición de la resistencia de una malla a tierra.....	13
Método de dos puntos	13
Método de tres puntos	14
Método de caída de potencial o método del 62%	14
Instalación de los sistemas de puestas a tierra para redes eléctricas, transformadores de distribución.	15
Conductor de cobre desnudo de los sistemas de puesta a tierra para transformadores de distribución	16
Determinación de la resistividad aparente del suelo mediante la fórmula de Hummel	17
Valores recomendados de resistencia de puesta a tierra.....	20
Cálculo de la resistencia de puesta a tierra	21
Mejoramiento en puestas a tierra para sistemas eléctricos de distribución.....	22
Aumento del número de electrodos	22
Mejoramiento de la resistencia de puesta a tierra mediante el aumento de la longitud de la varilla de cobre.....	23
Adecuación de la resistividad del terreno según las normas IEEE Std 80-2000.....	24
Ejemplo de modo uso de mejorador de suelo a base de bentonita (GEM Cadweld de Erico).....	25
Instrucciones instalación en zanjas:.....	26
Barras Químicas	27
Disposición de las varillas copperweld determinadas por el NEC ecuatoriano	28
Disposición 1 (T1 – 1) (1 Varilla enterrada verticalmente).....	29
Disposición 2 (T1 – 2) (2 Varillas enterradas verticalmente dispuestas en línea)	29
Disposición 3 (T1 – 3) (3 Varillas enterradas verticalmente dispuestas en línea)	30
Resistividades máximas permitidas para las disposiciones de puestas a tierra establecidas por el NEC Ecuatoriano.....	31
Equipo de medición (Teluometro)	32
Software para el diseño de puestas a tierra.....	32
IPI2WIN.....	32
CYPELEC Grounding IEC	33

H. FASES DEL PROCEDIMIENTO	34
Fase 1. Planificación y Preparación.	34
Fase 2. Sondeo eléctrico en Campo	35
Fase 3. Interpretación de datos recolectados	36
Procedimiento de utilización Software IPI2WIN.....	36
Procedimiento de cálculo de la resistencia aparente del suelo mediante CYPELEC Grounding IEC	39
I. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
J. ANEXOS.....	43
ANEXO 1. HOJA DE REGISTRO DE MEDICIONES.....	44
ANEXO 2. CALIBRES DE CONDUCTORES DESNUDOS PARA SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.....	45
ANEXO 3. EJEMPLO DEL MÉTODO PROPUESTO EN EL ÁMBITO TÉCNICO	46
ANEXO 4. HOJA DE REGISTRO DEL EJEMPLO DEMOSTRATIVO	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura G 1:Diagrama método de variación de profundidad o de tres puntas	6
Figura G 2: Método Wenner de cuatro puntas.....	7
Figura G 3: Arreglo convencional de cuatro electrodos para medir la resistividad del subsuelo.....	8
Figura G 4: Diferentes combinaciones del arreglo Wenner.....	8
Figura G 5: Método de cuatro puntos (Schlumberger)	9
Figura G 6:Modelo Biestratificado	11
Figura G 7: Grafico de Shunde.....	12
Figura G 8: Método de dos puntos mediante un equipo especializado	13
Figura G 9:Medición de la resistencia por el método de tres puntos.	14
Figura G 10: Medición de la resistencia de una puesta a tierra por método de caída de potencial.....	15
Figura G 11: Jabalina en forma vertical considerando el modelo de dos capas.....	18
Figura G 12:Jabalina en forma vertical considerando el modelo de tres capas	18
Figura G 13:Suelo multicapa equivalente a dos capas	19
Figura G 14: Instrucciones para la instalación de gel químico sobre conductor desnudo:....	26
Figura G 15:Instalación de gel químico para puesta a tierra	27
Figura G 16: Electrodo químico.....	28
Figura G 17: Varilla dispuesta verticalmente	29
Figura G 18: Disposición dos varillas verticales.....	30
Figura G 19: Disposición 3 varillas verticales	31
Figura G 20: Probador de resistencia de tierra	32
Figura G 21: Interfaz IPI2WIN	33
Figura G 22: Interfaz de programa CYPELEC Grounding IEC.....	34
Figura G 23: Pantalla ingreso de datos.....	36
Figura G 24: Curva de resistividad y campo	37
Figura G 25: Menú para nueva modelación	37
Figura G 26: Ajustes del nuevo modelo determinado por el programa.....	38
Figura G 27:Parámetros de inversión y elección de numero de capas.....	38
Figura G 28: Curva de campo de la resistividad del terreno	39
Figura G 29:Interfaz de programa CYPELEC Grounding IEC.....	40
Figura G 30:Resistividad del terreno ingreso de datos.....	41
Figura G 31: Combinación de electrodos con conductor enterrado horizontalmente.....	41
Figura G 32: Obtención de datos en campo proyecto eléctrico	46
Figura G 33: Datos tabulados del proyecto eléctrico	46

Figura G 34: Datos ingresados proyecto eléctrico	47
Figura G 35: Nuevo modelo en dos capas proyecto eléctrico	47
Figura G 36: Cálculo teórico de la resistencia aparente proyecto eléctrico para una varilla instalada	49
Figura G 37: Resistencia de una varilla instalada.....	49
Figura G 38:Cálculo teórico de la resistencia aparente proyecto eléctrico para dos varillas en línea.....	50
Figura G 39:Resistencia de disposición dos varillas instaladas en línea	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla G 1:Calibre recomendado para los sistemas de puesta a tierra para transformadores de distribución monofásicos.	16
Tabla G 2:Calibre recomendado para los sistemas de puesta a tierra para transformadores de distribución trifásicos.	17
Tabla G 3: Valores recomendados de resistencia de puesta a tierra	20
Tabla G 4: Valores de resistencia de puesta a tierra variando la longitud de la varilla.	23
Tabla G 5:Resumen de las resistividades máximas permitidas para las disposiciones de puestas a tierra	31

INTRODUCCIÓN

En la ejecución de un proyecto eléctrico, una puesta a tierra, es la instalación mediante conductor y varillas de cobre enterrados en el suelo, estos elementos se unen mediante conectores o se funden mediante suelta exotérmica y se conectan con los elementos conductores de los equipos o sistemas eléctricos. El sistema de puesta a tierra es la parte más importante de la construcción de un proyecto eléctrico, debido a que, se encarga de enviar y disipar a tierra perturbaciones eléctricas como descargas atmosféricas, fallas trifásicas asimétricas, transitorios y sobreintensidades (corrientes de falla) que aparecen en los diferentes puntos de un circuito eléctrico, estas perturbaciones se desvían hacia los electrodos enterrados en el suelo sin causar daños a personas y equipos, sin embargo, en el ámbito técnico, en ocasiones no le prestan atención necesaria al momento de realizar el diseño y construcción de redes eléctricas en los proyectos eléctricos, visto que, en la mayoría de los casos después de la instalación de los sistemas de puestas a tierra, no cumplen con las normas técnicas de construcción requeridas que son necesarias para la protección de perturbaciones eléctricas en un sistema eléctrico.

A. TÍTULO

Guía para el diseño de puestas a tierra de los transformadores de distribución y cámaras eléctricas mediante el uso de un software computacional.

B. OBJETIVOS

- Proporcionar información acerca de las metodologías, normas técnicas y procedimientos que deben poseer para contribuir a mejorar el diseño de los sistemas de puesta a tierra.
- Aportar un instrumento técnico - operativo que norme los procedimientos para el diseño de las puestas a tierra que se instalan en los transformadores de distribución.

C. ALCANCE

La presente guía está enfocada en la medición, análisis y mejoramiento del diseño de los sistemas de puesta a tierra de los transformadores de distribución y cámaras eléctricas que

se desarrollan en los proyectos eléctricos presentados por los profesionales del sector eléctrico. Esta guía es aplicable en todas las instancias no solo a nivel local sino también se puede hacer uso a nivel nacional.

D. **NORMATIVAS APLICABLES**

Normativas:

Normativas internacionales:

- IEEE STD 80 2000/2013 - Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- IEEE STD 81 1983 - Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System.
- IEC 60364-5-54 - International standard. Selection and erection of electrical equipment – Earthing arrangements, protective conductors and protective bonding conductors.

Normativas Nacionales:

- NEC Ecuatoriano

E. **TÉRMINOS Y DEFINICIONES**

Sistema de Tierra: Comprende todas las instalaciones interconectadas de puesta a tierra en un área específica.

Tierra. Conexión conductora, intencional o accidental, por el cual un circuito eléctrico o equipo está conectado a la tierra o a algún cuerpo conductor con extensión relativamente grande que sirve en su lugar de la tierra.

Electrodo a tierra. Conductor incrustado en la tierra que se usa para recoger la corriente a tierra o de disipación de la corriente de tierra en la tierra.

Tensión de Contacto. La diferencia de potencial entre los objetos metálicos o estructuras dentro del sitio de la subestación que pueden ser puenteados por contacto directo mano a mano o mano a los pies.

Resistividad del Terreno. Resistencia eléctrica entre las caras opuestas de un cubo de dimensiones unitarias (aristas = 1 m) llenado con este suelo. Sus unidades serán Ωm .

Telurómetro. Los telurómetros o telurímetros son equipos que miden la resistencia de puesta a tierra y la resistividad por el método de Wenner o Schlumberger.

Malla de Tierra. Una placa metálica sólida o un sistema de conductores desnudos muy próximos entre sí que están conectados y colocan a menudo en aguas poco profundas por encima de una malla de tierra o en otra parte a la superficie terrestre, a fin de obtener una medida adicional de protección minimizando el peligro de la exposición a altas tensiones de paso o contacto en un área de operación crítica o lugares que se utilizan con frecuencia por las personas. Fundamentada en las rejillas de metal, colocadas en o por encima de la superficie del suelo, o de malla de alambre colocada directamente debajo de la superficie del material, son formas comunes de una malla de tierra.

Soldadura Exotérmica. Resultado de un proceso que consigue la unión molecular de dos o más conductores metálicos mediante una reacción química.

Manual de procedimiento: documento con una descripción específica de procesos o procedimientos que forman parte de una actividad o servicio. Incluye deberes y responsabilidades, con referencia a la normativa general, controles administrativos y otros aspectos de orden operativo.

Proceso: conjunto de actividades mutuamente relacionadas o que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados.

Procedimiento: forma específica para llevar a cabo una actividad o un proceso.

Registro: documento que presenta resultados obtenidos o proporciona evidencia de las actividades desempeñadas, son todos aquellos formularios con la información compilada que se utilizan para llevar a cabo una actividad o proceso.

F. EQUIPOS, MATERIALES Y HERRAMIENTAS

Equipos de protección personal

El EPP o equipo de protección personal se debe hacer uso obligatorio para desempeñar cualquier actividad de construcción de redes eléctricas el equipo principal para la instalación de una puesta tierra tenemos:

- Casco
- Guantes de cuero
- Botas de seguridad dieléctricas y punta de acero
- Gafas de protección visual
- Uniforme de dotación

Medición de la resistividad del suelo

Para la medida de la resistividad del suelo necesitamos únicamente los siguientes elementos:

- Teluometro
- Software computacional (IPI2WIN, CYPELEC Grounding IEC)

Materiales del sistema de puesta a tierra

Los materiales para la instalación de una puesta a tierra o malla eléctrica se describen en la normativa, el inventario de materiales varía de acuerdo a la configuración de puesta a tierra elegida por el proyectista, entre los materiales más comunes tenemos:

- Varillas copperweld de 3/8" de longitud 1.8 metros de largo, la cantidad de varillas varía de acuerdo a la configuración elegida.
- Cable conductor de cobre desnudo mínimo Nro. 2 AWG para la instalación.
- Conectores o soldadura exotérmica de 90 Gr. o según para cada caso utilizar el método de unión que convenga.
- Gel químico a base de bentonita o cualquier tratamiento para el suelo en caso de que se requiera.

Herramientas

Entre las herramientas más frecuentes para la instalación de un sistema de puesta a tierra tenemos:

- Excavadora
- Pala
- Alicates
- Molde de soldadura
- Masilla Sellante para molde (En caso de que se requiera)
- Combo
- Cepillo para limpieza
- Ignitor o Chispero

G. GENERALIDADES

Resistividad del suelo o terreno

La resistividad del terreno es fundamental en el estudio de una puesta a tierra debido a que es el factor más importante para la conducción de las corrientes no deseadas hacia tierra, no es recomendable estimar la resistividad del terreno basándose en la clasificación del terreno debido a que éstas dan solamente una aproximación de la resistividad, la manera más confiable y exacta de saber el valor de la resistividad del suelo es realizar la toma de medidas directas en campo.

En la norma técnica RA6014 (EPM, 2008) menciona que la resistividad representa la resistencia específica del suelo a cierta profundidad, o de un estrato del suelo se obtiene indirectamente al procesar un grupo de medidas de campo y su magnitud se expresa en (Ωm) o (Ωcm). Numéricamente es la resistencia ofrecida por un cubo de 1m x 1m x 1m, medida entre dos caras opuestas.

La medición de la resistividad del suelo permitirá:

- Seleccionar una de las disposiciones para la conexión a tierra y de las redes de tierra antes de construirlas.
- Prever las características de conducción eléctrica del suelo

- Reducir costos de la instalación del sistema de puesta a tierra
- Ahorro de tiempo para conseguir la resistencia de puesta a tierra deseada

Técnicas para la medición de la resistividad del terreno

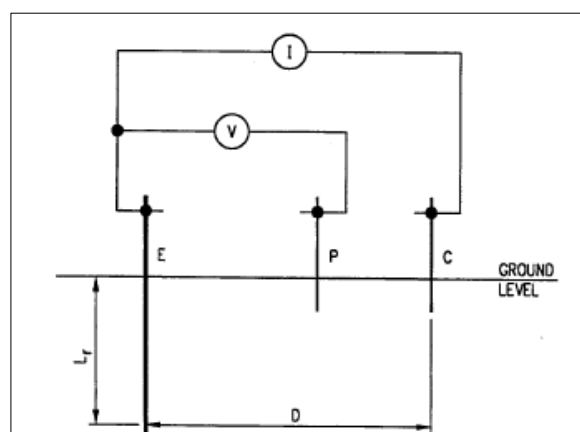
Dentro de las técnicas de medición para determinar la resistividad de los suelos establecidas por la norma IEEE Std 80 tenemos las siguientes:

- Método de variación de profundidad (Método de Tres puntos)
- Método de cuatro puntos (Wenner y Schlumberger)

Método de variación de profundidad

Este método es una prueba de resistencia a tierra que se lleva a cabo varias veces, cada vez la profundidad de enterramiento del electrodo probado aumenta en un incremento dado (IEEE, 2015). En la Figura 1, se muestra el circuito de conexión del método mencionado donde se varía la profundidad de L_r de la varilla E. Las dos picas auxiliares (P y C), se colocan en línea recta a poca profundidad. El procedimiento es el de disponer una varilla con marcaciones cada 20 o 30 cm, y cuya longitud debe ser la suficiente como para obtener la mayor información posible de las variaciones de la resistencia leída a medida que penetra la varilla en la tierra. (EPM, 2008)

Figura G 1: Diagrama método de variación de profundidad o de tres puntas



Fuente: (IEEE, 2015)

Esta técnica de medición solo debe aplicarse cuando no se disponga del espacio suficiente para utilizar el método de cuatro puntos, pues el sondeo es mucho menor y no garantiza mediciones exactas en este método se considera que el terreno es homogéneo.

Método de cuatro puntos

La norma (IEEE, 2015) indica que el método más exacto en la práctica de la medición de la resistividad media de grandes volúmenes de tierra sin perturbaciones es el método de cuatro puntos. En la medición de la resistividad de terreno por el método de cuatro puntos descritos en la normativa tenemos:

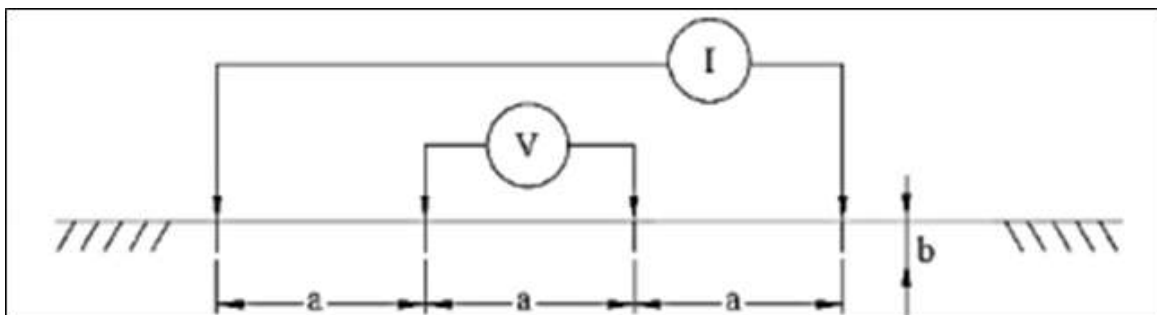
- Método de Wenner
- Método de Schlumberger

Método de Wenner

El método Wenner, como se muestra en la Figura 2, es la técnica más utilizada. En resumen, cuatro puntas se entierran en la tierra a lo largo de una línea recta, a distancias iguales, a una profundidad b . La tensión entre los dos electrodos interiores (potencial) medida se divide entre la corriente entre los dos electrodos exteriores (corriente) para dar un valor de la resistencia R (IEEE, 2000).

El método de cuatro electrodos o cuadripolo tipo Wenner es el método más preciso y popular. Por estas razones, este método obtiene la resistividad del suelo para capas profundas sin enterrar los electrodos a dichas profundidades, no es necesario un equipo pesado para realizar las medidas, los resultados no son afectados por la resistencia de los electrodos auxiliares o los huecos creados para hincarlos en el terreno. (GEOSEISMIC, 2017)

Figura G 2: Método Wenner de cuatro puntas

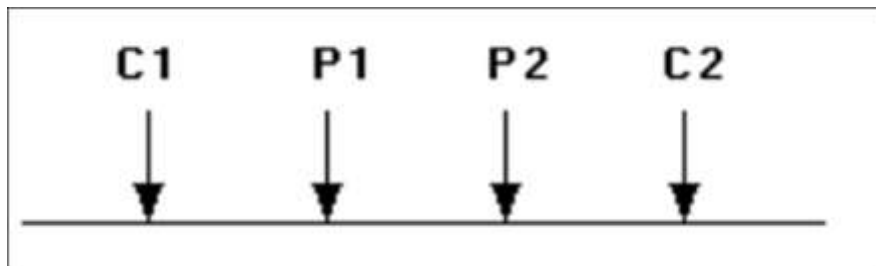


Fuente: (IEEE, 2012)

Arreglos del método de Wenner

En la figura 3, se muestra el arreglo tradicional de las cuatro puntas para el método de Wenner, (LOKE, 1999) indica que, el arreglo Wenner tiene diferentes combinaciones las cuales se presentan en la figura 4:

Figura G 3: Arreglo convencional de cuatro electrodos para medir la resistividad del subsuelo



Fuente: (LOKE, 1999)

La combinación C1 P1 P2 C2, es la más frecuente utilizada para realizar las mediciones para determinar la resistividad aparente del terreno, la configuración más utilizada se muestra en la figura 3. Esta configuración de los electrodos permite una visualización más rápida de la curva, ya que la resistividad es obtenida directamente a partir de los valores de resistencia R tomados por el dispositivo de medición (Teluometro).

Figura G 4: Diferentes combinaciones del arreglo Wenner

<p>Alfa Wenner</p> <p>C1 P1 P2 C2</p> <p>• ← a → • ← a → • ← a → •</p> <p>$\rho = 2\pi aR \text{ } [\Omega \cdot m]$</p>	<p>Beta Wenner</p> <p>C2 C1 P1 P2</p> <p>• ← a → • ← a → • ← a → •</p> <p>$\rho = 6\pi aR \text{ } [\Omega \cdot m]$</p>
<p>Gama Wenner</p> <p>C1 P1 C2 P2</p> <p>• ← a → • ← a → • ← a → •</p> <p>$\rho = 3\pi aR \text{ } [\Omega \cdot m]$</p>	<p>Wenner – Schlumberger</p> <p>C1 P1 P2 C2</p> <p>• ← na → • ← a → • ← na → •</p> <p>$\rho = \pi n(n + 1)aR \text{ } [\Omega \cdot m]$</p>

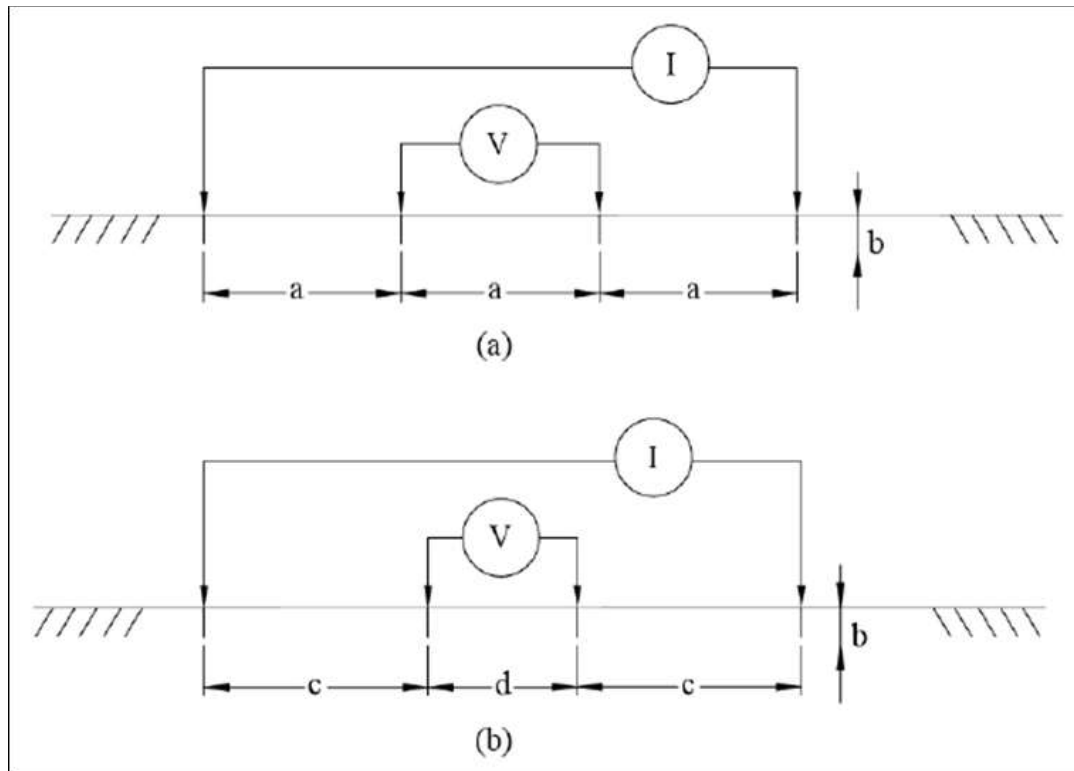
Fuente: (Perez, W., Serrano, C. & Surio, O., 2015)

Método de Schlumberger

El Método Schlumberger – Palmer es una versión modificada del método de Wenner. Este método proporciona una mayor sensibilidad para el espaciamiento de la sonda grande, como se describe en (IEEE, 2015). En este método, los electrodos de medición de diferencia de potencial, están separados por una longitud d [m]. Por otro lado, los electrodos de inyección

de corriente están separados por una distancia c [m], con respecto a los electrodos de medición de diferencia de potencial. En consecuencia, los dos electrodos de corriente están separados por una distancia $2c+d$, como se muestra en la figura 5.

Figura G 5: Método de cuatro puntos (Schlumberger)



Fuente: (IEEE, 2012)

Modelamiento del Suelo

La interpretación de la resistividad aparente obtenida en el campo es quizás la parte más difícil del programa de medición. El objetivo fundamental es obtener un modelo de suelo que sea una buena aproximación de la tierra real. La resistividad del suelo varía lateralmente y con respecto a la profundidad, en función de la estratificación del suelo (IEEE, 2015). Dicho esto, es necesario realizar una investigación del suelo para así determinar la composición general del suelo y su grado de homogeneidad. La parte más importante de las mediciones de la resistividad es obtener un modelo del suelo y hay que reconocer que el modelo de suelo es sólo una aproximación de las condiciones del suelo real y que la pareja perfecta es poco probable (IEEE, 2015). Los modelos más usados del suelo son:

- Modelo suelo homogéneo
- Modelo estratificado de suelo no homogéneo

Modelo suelo homogéneo

El modelo de suelo homogéneo debe usarse sólo cuando hay una variación moderada de la resistividad aparente. En condiciones de suelo homogéneo, que rara vez ocurren en la práctica, el modelo de suelo uniforme podrá ser razonablemente exacto. Si hay una gran variación de la resistividad aparente medida, el modelo de suelo uniforme es poco probable que produzcan resultados exactos. Un modelo de suelo uniforme puede ser usado en lugar del modelo de múltiples capas siempre que las herramientas de cálculo de dos capas o de múltiples capas no estén disponibles. Por desgracia, el límite superior obligado del error sobre todos los parámetros de conexión a tierra de referencia es difícil de estimar en general, pero cuando el contraste entre la capa de resistividades diferentes es moderado, con un valor promedio de resistividad se puede utilizar como una primera aproximación o para establecer el orden de las magnitudes. (IEEE, 2012)

La resistividad del suelo aproximada uniforme puede obtenerse mediante la adopción de una media aritmética de los datos de resistividad aparente medidos. Es difícil desarrollar un modelo de suelo uniforme cuando la resistividad de un suelo varía de manera significativa.

Modelo estratificado de suelo no homogéneo

El modelo estratificado de suelo no homogéneo se puede dividir en dos sub-modelos los cuales se mencionan a continuación:

- Modelo de dos capas o biestratificado
- Modelo multicapas

El modelo uniforme y el modelo de dos capas descritos anteriormente son los modelos de resistividad del suelo más utilizados, mientras que los modelo multicapa del suelo puede ser utilizado para las condiciones del suelo más complejas. La interpretación de las mediciones de resistividad del suelo se puede realizar de forma manual o mediante el uso de técnicas de análisis informático

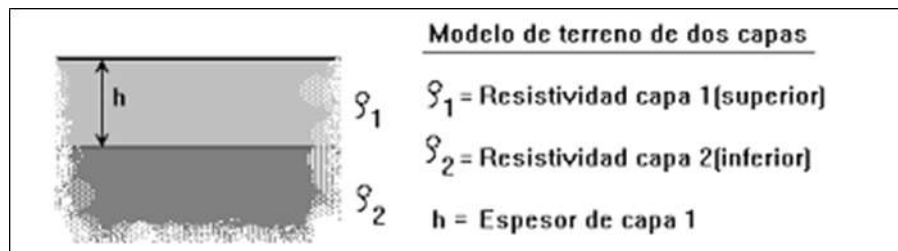
Modelo de suelo de dos capas (Biestratificado)

Un modelo de dos capas de suelo puede ser representado por una capa superior de suelo de una profundidad finita por encima de una capa inferior de profundidad infinita como se

muestra en la figura 6. El cambio brusco de la resistividad en los límites de cada capa de suelo se puede describir por medio de un factor de reflexión. En la figura 6 se muestra ρ_1 que viene dada por la resistividad de la primera capa (capa superior), la ρ_2 es la resistividad en la segunda capa (capa inferior) y h es el espesor de la primera capa.

Mientras que la representación más exacta de un sistema de puesta a tierra sin duda debe ser basada en las variaciones reales de la resistividad del suelo actual en el sitio de la subestación, rara vez se justifica económicamente o es técnicamente viable modelar todas estas variaciones. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la representación de un electrodo a tierra basado en un modelo equivalente de tierra de dos capas es suficiente para el diseño de un sistema de puesta a tierra segura.

Figura G 6:Modelo Bistratificado



Fuente: (MENDOZA, 2001)

La norma estándar IEEE 81-1983 proporciona métodos para la determinación las resistividades equivalentes de la capa superior e inferior de suelo y la altura de la capa superior de dicho modelo.

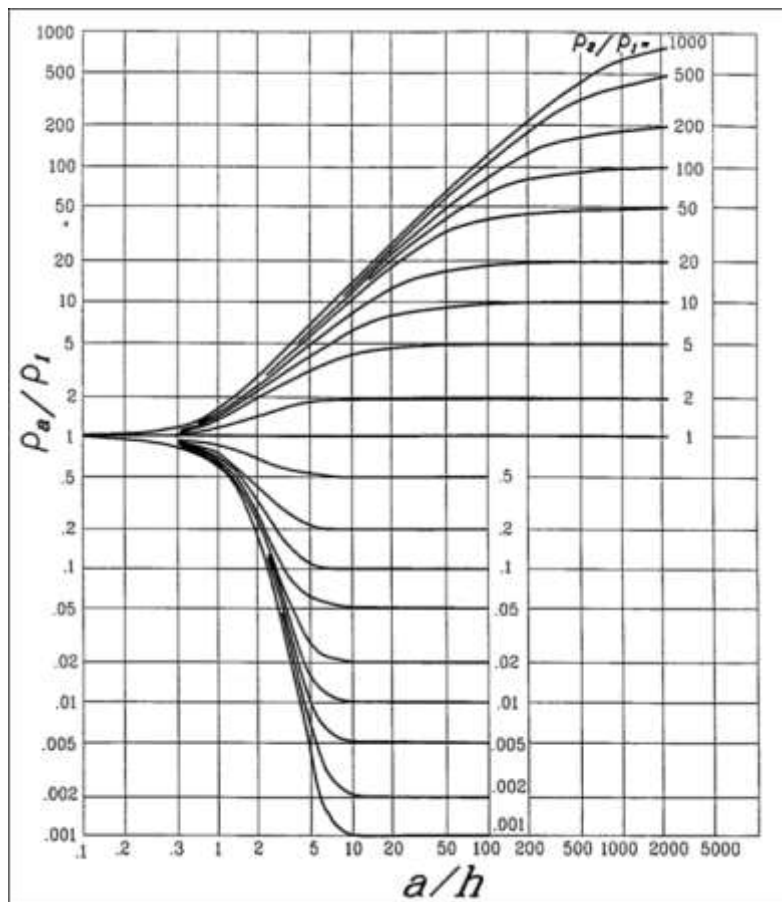
Modelo de suelo de dos capas por el método gráfico de Shunde

En el método Shunde, es un método sugerido en la norma IEEE-80 en donde, la gráfica que se muestra en la Figura 7, se utiliza para aproximar a un modelo de suelo de dos capas, que se basa en los datos de prueba del método Wenner. A partir de la curva de resistividad aparente obtenida de las mediciones, son seleccionados los parámetros ρ_1 y ρ_2 por inspección visual. La profundidad de la primera capa "h" se determina a través de gráficas formadas de resultados o experiencia acumulada.

Los parámetros ρ_1 y ρ_2 se obtienen mediante la inspección de las mediciones de resistividad. Sólo h se obtiene por el método gráfico de Shunde, de la siguiente manera:

- i) Trazar una curva de resistividad aparente ρ_a en el eje Y vs el espaciado de las puntas en el eje X.
- j) Estimación de ρ_1 y ρ_2 del gráfico de trazado en a). el ρ_a que corresponde a la distancia más pequeña es ρ_1 y para una separación más grande es ρ_2 . Amplíe el gráfico de resistividad aparente en ambos extremos para obtener estos valores de resistividad extremos si los datos de campo son insuficientes.
- k) Determinar ρ_2 / ρ_1 y seleccione una curva en el gráfico Shunde en la Figura 8, que coincida cerca, o interpole y dibuje una nueva curva en el gráfico.
- l) Seleccione el valor en el eje Y de ρ_a / ρ_1 dentro de la región con pendiente de la curva adecuada de ρ_2 / ρ_1
- m) Lea el valor correspondiente de a/h en el eje-x. de la figura 8.
- n) Calcule ρ_a multiplicando el valor seleccionado, ρ_a / ρ_1 , en (d) por ρ_1
- o) Lea la correspondiente separación de la sonda en la gráfica de resistividad aparente trazada en a).
- p) Calcule h , la profundidad del nivel superior, usando la adecuada separación de la sonda, a .

Figura G 7: Grafico de Shunde



Fuente: (IEEE, 2015)

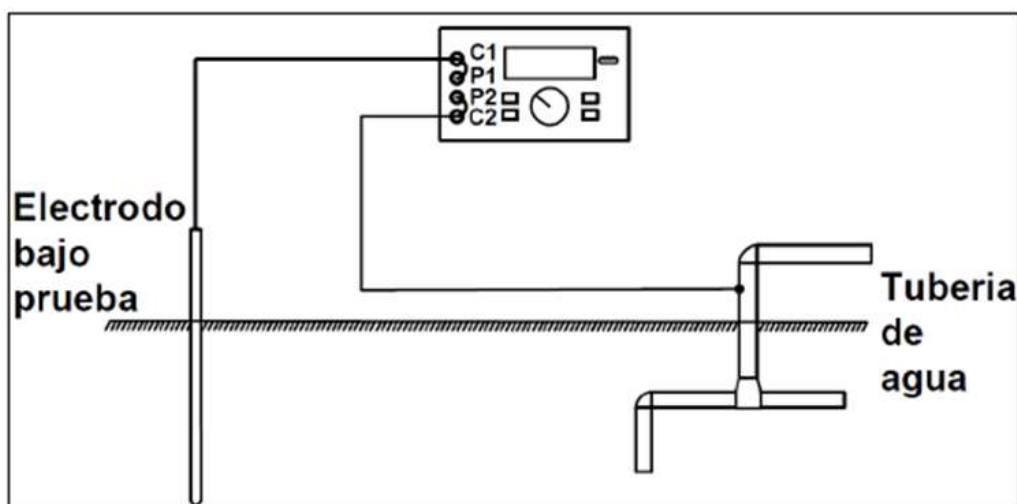
Métodos para la medición de la resistencia de una malla a tierra

La medición de la resistencia a tierra se realiza mediante toma de datos mediante equipos especializados como el Megger o Teluometro. En la norma IEEE Std 80 se mencionan los diferentes tipos de medición de la resistencia de puesta a tierra las cuales describiremos a continuación:

Método de dos puntos

En este método la resistencia del sistema de puesta a tierra es medida en serie con el electrodo auxiliar, la resistencia de este último es despreciable en comparación con la del sistema, usualmente este método se utiliza para realizar mediciones en una residencia, en donde el electrodo auxiliar puede ser las tuberías metálicas que suministran agua las cuales presentan una resistencia de alrededor de 1Ω y la resistencia de un sistema de puesta a tierra de una casa se presume debería de ser 25Ω que es mucho mayor que la resistencia del electrodo auxiliar. Este método se presta a muchos errores como por ejemplo si la tubería que funciona como electrodo auxiliar se acerca demasiado al sistema de puesta a tierra en estudio o si la resistencia del sistema está en el rango de la resistencia del electrodo auxiliar. (Perez, W., Serrano, C. & Surio, O., 2015). En la figura 8 se muestra el método de medición de dos puntos, la medición de la resistencia de puesta a tierra se realiza mediante un equipo especializado como el Teluometro.

Figura G 8: Método de dos puntos mediante un equipo especializado

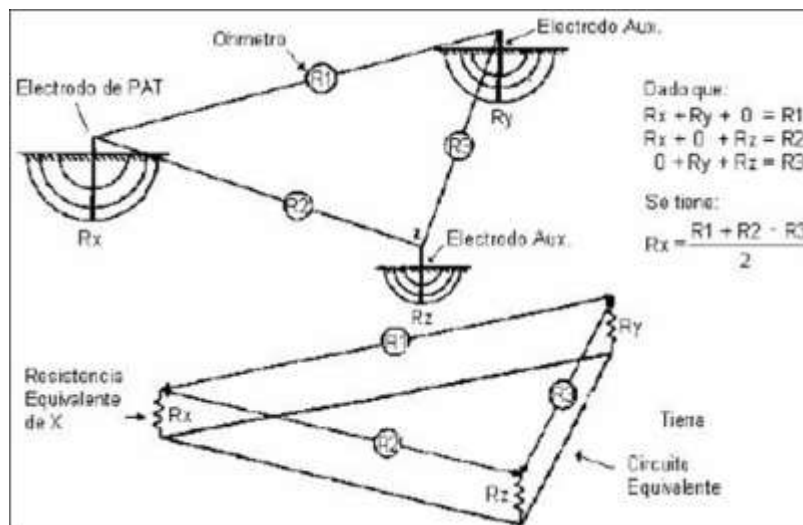


Fuente: (Manual de aplicación de la norma IEEE Std 81 para líneas y subestaciones eléctricas de transmisión., 2015)

Método de tres puntos

En este método se utilizan dos electrodos auxiliares con resistencias conocidas R_y y R_z respectivamente, que se pretende sean similares a la del electrodo o sistema en estudio. Estos dos electrodos se colocan formando un triángulo con el electrodo en estudio, luego con un equipo especializado se mide la resistencia entre cada uno de los electrodos como se muestra en la figura 9, no se inyecta corriente de prueba.

Figura G 9: Medición de la resistencia por el método de tres puntos.



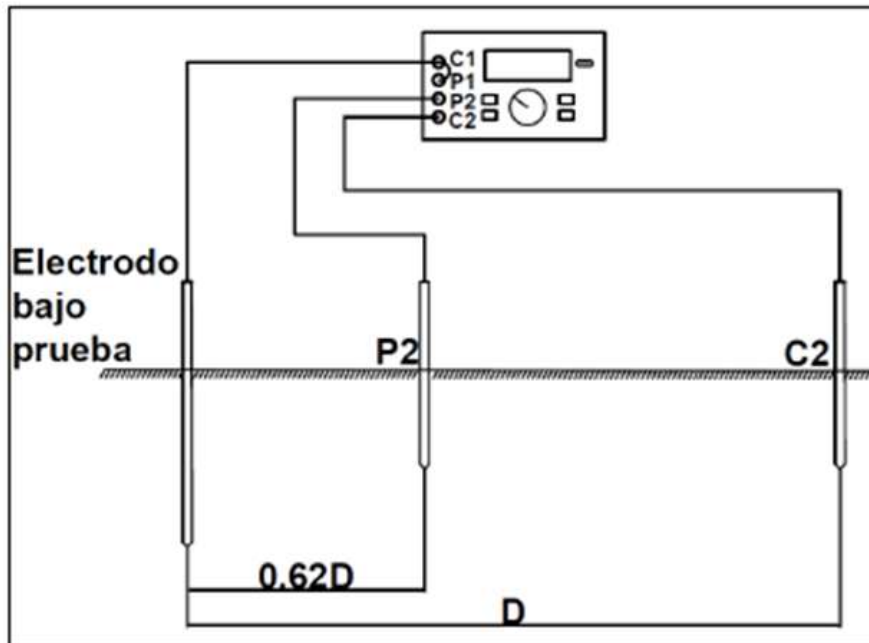
Fuente: (Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra., 2017)

Al realizar las operaciones necesarias para despejar R_x , obtenemos como resultado la resistencia del sistema de puesta a tierra. Se recomienda que la distancia entre electrodos sea de 8 metros o más para un electrodo simple para evitar superposición de gradientes de potencial (Perez, W., Serrano, C. & Surio, O., 2015). Este método es complicado de aplicar en sistemas de puesta a tierra grandes, se prefiere utilizar otros métodos sobre todo si se desea más precisión.

Método de caída de potencial o método del 62%

En este método se utilizan dos electrodos auxiliares conocidos como electrodo de corriente y electrodo de potencial que se colocan en una misma dirección. (Perez, W., Serrano, C. & Surio, O., 2015). El método consiste en inyectar una corriente constante entre el electrodo en estudio y el electrodo de corriente, seguidamente leer el valor de voltaje entre el electrodo en estudio y el electrodo de potencial, todo esto utilizando equipo como un voltímetro, un amperímetro y una fuente de corriente como se presenta en la figura 10.

Figura G 10: Medición de la resistencia de una puesta a tierra por método de caída de potencial.



Fuente: (Perez, W., Serrano, C. & Surio, O., 2015)

La distancia D , debe de ser 5 veces la longitud más larga del sistema de puesta a tierra en estudio de la norma (IEEE, 2012) el electrodo de potencial debe de estar a una longitud que sea el 62% de la longitud entre el electrodo o sistema de puesta a tierra en estudio, esta distancia se basa en la posición teóricamente correcta para medir la exacta impedancia de los electrodos para un suelo con resistividad uniforme. Este método, al igual que el arreglo Wenner del método de cuatro puntos para la medición de resistividad del suelo, también se puede utilizar en suelos con cubiertas de pavimento, concreto o cemento (Perez, W., Serrano, C. & Surio, O., 2015)

Instalación de los sistemas de puestas a tierra para redes eléctricas, transformadores de distribución.

Las empresas distribuidoras establecen las normativas para la instalación para las puestas a tierra, como por ejemplo en la empresa eléctrica Quito (EEQUITO, 2014), en su normativa establecen que las conexiones a tierra del neutro se efectuarán, por lo menos, en los siguientes puntos del sistema:

- d) Para redes de distribución en áreas urbanas: En los centros de transformación y en los dos terminales del circuito secundario más alejados del transformador.

- e) Para redes de distribución en áreas rurales: Similar al literal “a” y además para circuitos secundarios prolongados en puntos intermedios a intervalos de 200 m.
- f) Para circuitos primarios y líneas de distribución a 22,8 kv, con neutro continuo: a intervalos de aproximadamente 300 m en toda su longitud y además en los puntos terminales.

Conductor de cobre desnudo de los sistemas de puesta a tierra para transformadores de distribución

Los conductores de cobre desnudo pueden ser sólidos o cableados, y puede ser suministrados con temple duro, semiduro o suave. Los conductores cableados son trenzados concéntricamente. Los conductores de cobre desnudo del tipo sólido y trenzado clases AA y A son utilizados para líneas de transmisión y distribución de energía eléctrica; conductores trenzados de mayor flexibilidad (clases B y C) son usados en sistemas de puesta a tierra de equipos eléctricos, subestaciones, entre otras aplicaciones (ELECTROCABLES, 2018).

En la tabla 1 se indica los calibres de conductor cobre desnudo recomendados para la instalación de sistemas de puestas a tierra en transformadores monofásicos y en la tabla 2 los calibres de conductor para los transformadores trifásicos. los valores se calcularon mediante los procedimientos establecidos por la norma internacional (IEEE, 2000).

Tabla G 1: Calibre recomendado para los sistemas de puesta a tierra para transformadores de distribución monofásicos.

Potencia [KVA]	Corriente Cortocircuito [A]	Área transversal del conductor [mm²]	Calibre del conductor
3	833,33	5,16	10
5	1388,89	8,61	8
10	2777,78	17,21	4
15	4166,67	25,82	2
25	6944,44	43,03	1
37,5	10416,67	64,54	2/0
50	13888,89	86,06	3/0
75	20833,33	129,08	250

Fuente: Autor

Las normas nacionales e internacionales recomiendan que el calibre del conductor para sistemas de puesta a tierra para transformador monofásico de potencia menor a 15 KVA no sea menor a 2 AWG.

Tabla G 2: Calibre recomendado para los sistemas de puesta a tierra para transformadores de distribución trifásicos.

Potencia [KVA]	Corriente Cortocircuito [A]	Área transversal del conductor [mm²]	Calibre del conductor
30	2624,32	16,26	4
45	3936,48	24,39	2
50	4373,87	27,10	2
75	6560,80	40,65	1
100	8747,73	54,20	1/0
112,5	9841,20	60,98	2/0
125	10934,66	67,75	2/0
150	13121,60	81,30	3/0

Fuente: Autor

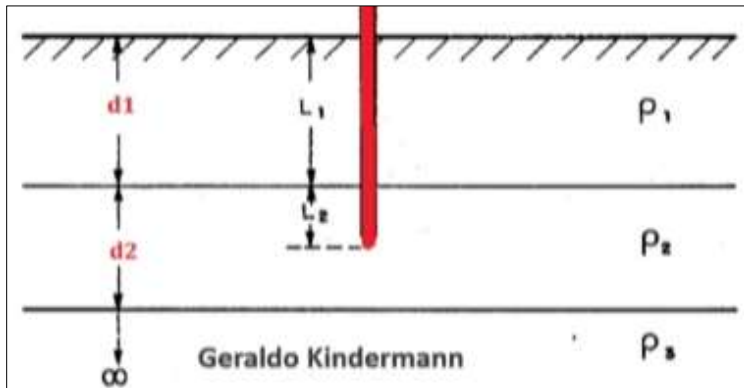
Las normas nacionales e internacionales recomiendan que el calibre del conductor para sistemas de puesta a tierra para transformadores trifásicos de potencia menor a 50 KVA no sea menor a 2 AWG.

Determinación de la resistividad aparente del suelo mediante la fórmula de Hummel

Obtenidos los datos en campo sea por el método de Wenner o Schlumberger, se procede a calcular la resistividad aparente del suelo, este parámetro es muy importante para el diseño del sistema de puesta a tierra, para el caso de diseño de puestas a tierra de transformadores de distribución se ha mencionado la determinación de la modelación del suelo en dos capas, pero inclusive hay la posibilidad de realizarla hasta de 3 capas por medio de la utilización de la fórmula de Hummel.

En la figura 11 la línea vertical roja indica la disposición de una varilla de cobre enterrada verticalmente, tal como se observa se considera que, la varilla se encuentra ubicada entre la primera y segunda capa del suelo.

Figura G 11: Jabalina en forma vertical considerando el modelo de dos capas



Fuente: (KINDERMANN, 2020)

Como se indica en la figura 11 si modelo del suelo fuera de dos capas la resistividad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\rho\alpha = \frac{L_1 + L_2}{\frac{L_1}{\rho_1} + \frac{L_2}{\rho_2}} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$\rho\alpha$: Resistividad aparente del suelo

L_1 : Diámetro de la primera capa en la que atraviesa la varilla

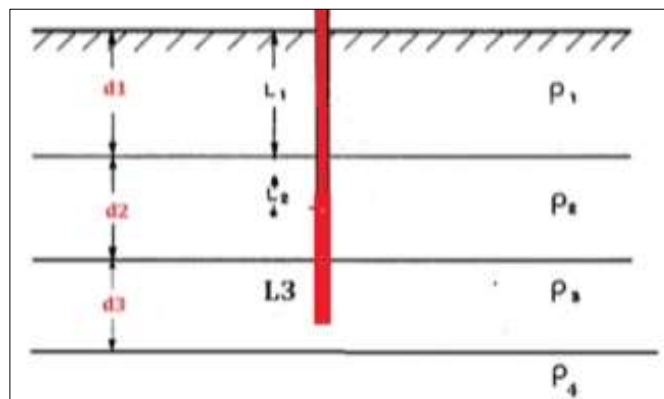
L_2 : Diámetro de la segunda capa en la que atraviesa la varilla

ρ_1 : Resistividad de la primera capa

ρ_2 : Resistividad de la segunda capa

En la figura 12 se muestra la disposición de una varilla enterrada en el suelo considerando que atraviesa 3 capas de suelo

Figura G 12: Jabalina en forma vertical considerando el modelo de tres capas



Fuente: (KINDERMANN, 2020)

Como se indica en la figura 13 si modelo del suelo fuera de tres capas la resistividad se

calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\rho\alpha = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{\frac{L_1}{\rho_1} + \frac{L_2}{\rho_2} + \frac{L_3}{\rho_3}} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

$\rho\alpha$: Resistividad aparente del suelo

L_1 : Diámetro de la primera capa en la que atraviesa la varilla

L_2 : Diámetro de la segunda capa en la que atraviesa la varilla

L_3 : Diámetro de la tercera capa en la que atraviesa la varilla

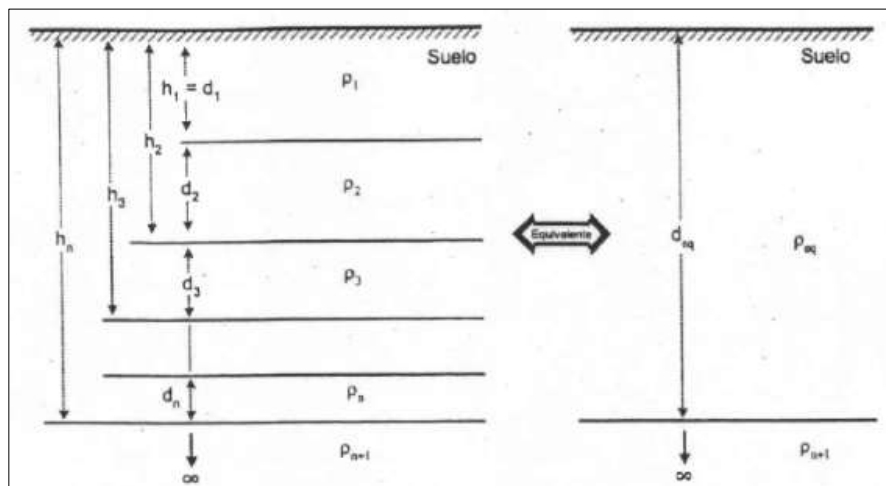
ρ_1 : Resistividad de la primera capa

ρ_2 : Resistividad de la segunda capa

ρ_3 : Resistividad de la tercera capa

El cálculo de la resistividad aparente con un suelo con muchas capas debe ser reducido a un suelo equivalente a dos capas, el procedimiento de reducción se hace a partir de la superficie considerando paralelas las capas y mediante la fórmula de Hummel se transforma directamente a un suelo con dos capas. En la figura 16 se muestra un terreno multicapa y su equivalencia a dos capas.

Figura G 13: Suelo multicapa equivalente a dos capas



Fuente: (KINDERMAN, 2010)

La fórmula para transformar a una equivalente a dos capas es la siguiente:

$$\rho_{eq} = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2}{\rho_2} + \frac{d_3}{\rho_3} + \dots + \frac{d_n}{\rho_n}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_t}{\sum_{i=1}^n \frac{d_t}{\rho_t}} \quad \text{Ec. 3}$$

Fórmula para cálculo del espesor de la capa:

$$d_{eq} = d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n = \sum_{i=1}^n d_i \quad \text{Ec. 4}$$

Valores recomendados de resistencia de puesta a tierra.

En la actualidad existen varias normas que estandarizan e indican el valor máximo permitido para el sistema de puesta a tierra, actualmente a nivel nacional han optado por regirse a normas internacionales como la IEEE Std 80-2000 y la norma IEEE Std 80-2013 entre otras existen lineamientos como en el portal de compras públicas en su documento especifica que para el montaje de transformadores y equipos las varillas de puesta a tierra se colocará a una distancia no menor de 0.65 m de la base del poste, colocada mediante excavación (en caso de suelo duro) y conectada mediante suelda exotérmica # 90. Si la medición de la resistencia de puesta a tierra resulte ser mayor a 25 Ohmios, deberá aumentarse las varillas de acuerdo al procedimiento vigente, estos valores serán reportados a fiscalización. (COMPRAS P., 2020).

De igual manera en el portal de la empresa eléctrica Quito, especifica que el proyectista deberá seleccionar una de las disposiciones para la conexión a tierra, que se muestran en la Parte "B" Sección B-50, (EEQUITO, 2014) de acuerdo al valor de la resistividad del terreno, a fin de obtener un valor de resistencia de puesta a tierra de 25 ohmios para instalaciones aéreas y 5 ohmios para instalaciones subterráneas. De las normas mencionadas anteriormente se extrajo los valores indicados en la tabla 3, con la que actualmente se construye y fiscaliza el valor de resistencia de los sistemas de puesta a tierra.

Tabla G 3: Valores recomendados de resistencia de puesta a tierra

Descripción	Resistencia (Ohms)
Estructuras de líneas de transmisión	20
Subestaciones de alto y extra alto voltaje ($\geq 115\text{kV}$)	1
Subestaciones de medio voltaje de uso exterior en poste o interior	10
Instalaciones de redes eléctricas aéreas media tensión (7.9 – 13.8 kv)	25
Instalaciones de redes eléctricas subterráneas (7.9 – 13.8 kv)	5
Neutro de acometida en baja tensión (110 – 220 V)	25
Equipos electrónicos sensibles	5

Fuente: (Std 80-2013 IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, 2015) & (EEQUITO, Normas para sistemas de distribución parate A, 2014)

Cálculo de la resistencia de puesta a tierra

En la norma (IEC 60364-5-54) especifica las ecuaciones para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra. Para el caso de un conductor enterrado horizontal, la resistencia de tierra, en función de la resistividad del terreno, es:

$$R = \frac{2 \cdot \rho}{L} \quad \text{Ec.5}$$

Donde:

ρ : Resistividad del terreno (Ohm*m)

L: Longitud total del conductor (m)

Para el caso de una pica vertical aislada, la resistencia de tierra, en función de la resistividad del terreno, es:

$$R = \frac{\rho}{L} \quad \text{Ec.6}$$

Donde:

ρ : Resistividad del terreno (Ohm*m)

L: Longitud de una pica (m)

Para el caso de un grupo de picas, la resistencia de tierra, en función de la resistividad del terreno, se calcula de la forma siguiente:

$$R_p = \frac{K \cdot R_{1p}}{n} \quad \text{Ec.7}$$

$$R_{1p} = \frac{\rho}{L} \quad \text{Ec.8}$$

Donde:

R_p : Resistencia del grupo de 'n' picas dispuestas en paralelo (Ω)

R_{1p} : Resistencia de una pica (Ω)

N: Número de picas dispuestas en paralelo

K: Coeficiente de mejora que depende del número de picas, de su disposición y separación (D), así como de la longitud total de las mismas (L)

ρ : Resistividad del terreno (Ωm)

L: Longitud de una pica (m)

Al tratarse de picas dispuestas en paralelo unidas mediante un cable conductor, la resistencia total se calcula de la forma siguiente:

$$\frac{1}{Rg} = \frac{1}{Rp} + \frac{1}{Rc} \quad \text{Ec.9}$$

La resistencia conseguida para el conjunto de electrodos de la instalación de puesta a tierra se calcula de la forma siguiente:

$$\frac{1}{Rt} = \sum \frac{1}{Re} \quad \text{Ec.10}$$

Mejoramiento en puestas a tierra para sistemas eléctricos de distribución

El mejoramiento de las puestas a tierra involucra tratar de mejorar las condiciones físicas del sistema, a fin de obtener un diseño que este dentro de los parámetros establecidos por las normativas, a continuación, se presentan algunos métodos de mejora, para adquirir un valor de la resistencia ideal de un sistema de puesta a tierra.

Aumento del número de electrodos

En el Código De Práctica Ecuatoriano CPE INEN 19:2001, en la sección 250-84 indica que, un electrodo único, que consista en una varilla, tubería o placa y que no tenga una resistencia a tierra de 25 Ohms o menos, se debe complementar con un electrodo adicional de cualquiera de los tipos especificados en 250-81 o 250-83. Cuando se instalen varios electrodos de barras, tubos o placas para cumplir los requisitos de esta sección, se deben colocar a una distancia mínima de 1,83 m entre sí y deben estar efectivamente conectados entre sí. (INEN, 2018)

NOTA: La instalación en paralelo de varillas de más de 2,4 m aumenta la eficiencia si se separan más de 1,8 m. (INEN, 2018)

Considerando lo descrito en la sección 250-84 del Código Eléctrico Nacional Ecuatoriano se determina que al aumentar el número de varillas y aumentar la longitud en los sistemas de puesta a tierra, se obtendrá una disminución de la resistencia de puesta a tierra.

En conclusión, en la práctica, es muy recomendable aumentar el número de electrodos debido a que es una manera muy efectiva de reducir significativamente la resistencia de puesta a tierra, también se debe considerar como indica la norma 250-84 la distancia entre varillas, debido a la generación de potencial eléctrico generado en el electrodo, en un sistema de puesta a tierra con electrodos a una corta distancia no reduciría la resistencia y produciría efectos secundarios.

Mejoramiento de la resistencia de puesta a tierra mediante el aumento de la longitud de la varilla de cobre.

En el Ecuador se comercializa varillas copperweld con diámetros entre 1.20 m y 2.4 m, pero existe casos donde las capas superiores son de piedra, arena y la capa ideal se encuentra por debajo del diámetro máximo de varillas de cobre que se comercializa, para estos casos existen varillas roscadas que se acoplan a otras para lograr longitudes mayores a la que necesitamos.

En la tabla 4 se evalúa el comportamiento de la resistencia de puesta a tierra de una varilla de cobre enterrada verticalmente a 60 cm de profundidad a una resistividad del terreno de 50Ωm, con una varilla Copperweld, de 0,016m de diámetro y variando su longitud, el valor de la longitud se toma de las varillas que se comercializan actualmente. Para la obtención de datos se obtuvieron mediante el software CYPELEC Grounding IEC.

Tabla G 4: Valores de resistencia de puesta a tierra variando la longitud de la varilla.

Resistividad del terreno [Ωm]	Longitud de la varilla [m]	Diámetro de la varilla [m]	Resistencia de puesta a tierra [Ω]
50	1,20	0,016	33,33
50	1,50	0,016	27,78
50	1,80	0,016	23,81
50	2,40	0,016	18,52
50	3	0,016	15,15

Fuente: Autor

Como podemos observar en la tabla 4, a medida que se aumenta la longitud de la varilla disminuye la resistencia de puesta a tierra y se evidencia que el método de variar la longitud de la varilla parece una buena técnica, pero no se recomienda utilizar varillas a más de 3 metros de longitud, debido a que el valor económico de la varilla aumenta de precio a mayor longitud, además que en ocasiones no se presenta un terreno homogéneo.

Adecuación de la resistividad del terreno según las normas IEEE Std 80-2000.

Anteriormente se ha expuesto que, al aumentar el número de varillas, utilizar varillas con mayor longitud y el uso de varillas en paralelo, baja la resistencia a tierra, sin embargo, cuando lo descrito no es posible, se tiene que mejorar el terreno mediante diferentes métodos químicos detallados en la norma IEEE 80 – 2000.

A menudo es imposible lograr la deseada reducción de la resistencia de tierra mediante la adición de más conductores a la malla o más barras de tierra. Una solución alternativa es aumentar la eficacia del diámetro de la varilla mediante la modificación del suelo que rodea al electrodo. La cubierta interna del suelo más cercana al electrodo, suele estar compuesta por la capa de mayor resistividad. La modificación del terreno que rodea la puesta a tierra, se puede realizar utilizando los siguientes métodos:

- e. Usando cloruro de sodio, magnesio y sulfatos de cobre, o cloruro de calcio, para incrementar la conductividad del suelo que rodea un electrodo. El estado o las autoridades federales pueden no permitir el uso de este método debido a la lixiviación (lavado o filtrado del suelo) posible a las áreas circundantes. Además, el tratamiento con sal debe ser renovada periódicamente.

- f. Usando bentonita, una arcilla natural que contiene los minerales montmorillonite, que se formó hace unos años por la acción volcánica. No es corrosivo, estable y tiene una resistividad de $2,5 \Omega \cdot m$ y una humedad del 300%. Los resultados de baja resistividad principalmente de un proceso electrolítico entre el agua, Na_2O (óxido de sodio), K_2O (óxido de potasio), CaO (Óxido de Calcio – Cal Viva), MgO (Óxido de magnesio), y otras sales minerales que se ionizan formando un electrolito fuerte con un pH de 8 a 10. Este electrolito no se filtrará gradualmente, ya que forma parte de la propia arcilla. Siempre con una cantidad suficiente de agua, se hincha hasta 13 veces su volumen en seco y se adherirá a cualquier superficie que toca. Debido a su carácter higroscópico, actúa como agente de secado de sacar la humedad disponible en el medio ambiente circundante. La Bentonita necesita de agua para obtener y mantener sus características beneficiosas. Su contenido de humedad inicial se obtiene en la instalación cuando la mezcla se prepara. Una vez instalada, la bentonita se basa en la presencia de humedad en el suelo para mantener sus características. La mayoría de los suelos tienen suficiente humedad para que el secado sea una preocupación. La naturaleza higroscópica de la bentonita aprovechará el agua disponible para mantener su condición de instalación. Si se expone a la luz solar directa, tiende a aislarse, previniendo el proceso de secado de las partes más

profundas. No puede funcionar bien en un ambiente muy seco, ya que puede retroceder ante el electrodo, aumentando la resistencia del electrodo.

- g. Usando electrodos del tipo químico que consiste en un tubo de cobre lleno de una sal. Los agujeros en el tubo permiten que la humedad entre, las sales se disuelvan, y la solución de sales se filtre en el suelo. Estos electrodos se instalan en un agujero predicho y, normalmente, relleno de tierra, con el tratamiento del suelo.
- h. Los materiales de mejora de tierra, algunos con una resistencia de menos de $0,12 \Omega \cdot m$ (alrededor del 5% de la resistividad de la bentonita), normalmente se colocan alrededor de la varilla en un agujero predicho o alrededor de los conductores a tierra en una zanja, ya sea en forma seca o premezclado. Algunos de estos materiales de mejora son permanentes y no se filtrará ningún producto químico en el suelo. Otros materiales disponibles se mezclan con el suelo en cantidades variables y poco a poco se filtrarán en el suelo circundante, disminuyendo la resistividad del terreno.

La bentonita entre otros compuestos como el sulfato de magnesio o de sulfato de cobre, o de compuestos químicos patentados THOR GEL, (GEM Cadweld de Erico), el GAP de Alta Conductividad 2000 S.A., GRAF de IPECSA, Cero-Ohm, Inte-France, etc.) estos materiales mencionados cumplen con los requisitos para la disminución de la resistencia de puesta a tierra

Ejemplo de modo uso de mejorador de suelo a base de bentonita (GEM Cadweld de Erico)

El tratamiento del suelo mediante GEM 25A reduce la resistividad del suelo en un 40-60% a continuación se presentan algunas características del Gel Químico a base de bentonita. (ERICO, 2021).

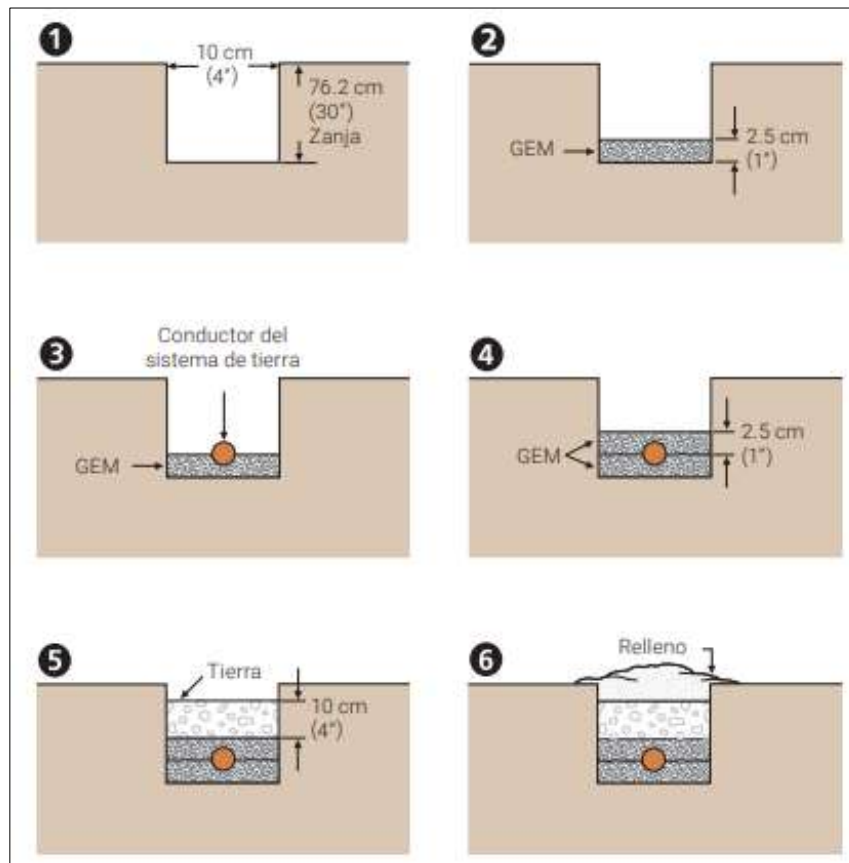
- Reduce dramáticamente la resistencia a tierra y medidas de impedancia
- Tras la curación del material, mantiene una resistencia constante durante toda la vida útil del sistema
- Mejora la puesta a tierra en todos los suelos, incluso durante períodos secos.
- No se disuelve ni descompone con el paso del tiempo
- No requiere tratamientos periódicos de carga ni reemplazos
- No requiere mantenimiento

- No depende de la presencia continua de agua para mantener su conductividad
- Evita la corrosión
- No se degrada
- No contamina
- No requiere humedad constante

Instrucciones instalación en zanjas:

A continuación, se muestran las instrucciones para la utilización del gel químico (ERICO, 2021). En la figura 14 se muestra el método de instalación en zanja para conductor de cobre desnudo y se describe uno a uno como realizar la instalación.

Figura G 14: Instrucciones para la instalación de gel químico sobre conductor desnudo:



Fuente: (ERICO, 2021)

1. Pre mezclar el GEM para preparar una mezcla. Utilice de 1.5 a 2 galones (5.7 a 7.6 litros) de agua potable por bolsa o cubeta. Para preparar el GEM en forma de lechada, utilice un mezclador de concreto estándar o mezcle en una cubeta, caja mezcladora, carretilla, etc. Utilice de 1.5 a 2 galones (5.7 a 7.6 litros) de agua potable por bolsa o cubeta. No mezcle el GEM con agua salada.

2. Ponga suficiente mezcla de GEM para cubrir uniformemente el fondo de la zanja con más o menos 2.5 cm. (1 pulgada) de espesor.
3. Coloque el conductor sobre el GEM.
4. Ponga más GEM sobre el conductor hasta cubrirlo completamente con unos 2.5 cm. (1 pulgada) de espesor. Espere a que el GEM endurezca, aproximadamente de 30 minutos a una hora antes de poner el relleno natural de la zanja.
5. Cuidadosamente cubra el GEM con tierra hasta unos 10 cm. (4 pulgadas) de la superficie, cuidando que el conductor no quede expuesto.
6. Compacte la tierra y termine de cubrir la zanja con más tierra.

Nota 1: Espere a que el GEM endurezca, aproximadamente de 15 a 20 minutos antes de colocar el conductor. Se debe de instalar 10 cm. (4 pulgadas) de material aislante en los conductores y electrodos en la zona de interface (aire-terreno), empezando 5 cm. (2 pulgadas) dentro del GEM.

Nota 2: Quite el exceso de agua si hubiere.

En la figura 15 se muestra la instalación del gel químico en sistemas de puesta a tierra con varilla copperweld.

Figura G 15: Instalación de gel químico para puesta a tierra



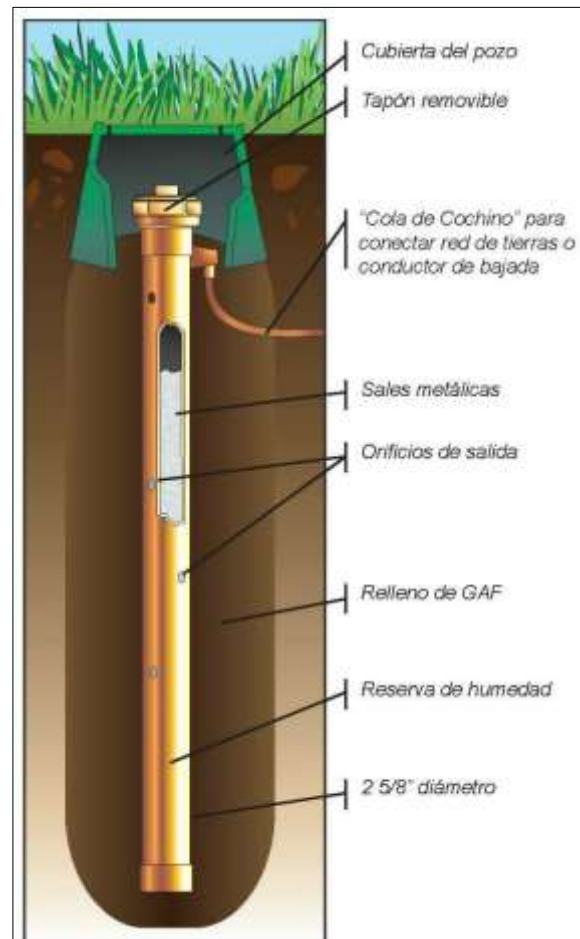
Fuente: (SEBATELEC, 2021)

Barras Químicas

Se utilizan barras químicas, debido a la rapidez en su instalación, en lugares donde es difícil instalar una malla de tierra común, como por ejemplo subterráneos de edificios, oficinas, hospitales, bancos, edificios habitacionales, pisos enlozados etc. Los electrodos químicos son una alternativa de tierra eléctrica muy versátil puesto que se pueden instalar de forma vertical, horizontal, diagonal o como lo permita el terreno. La profundidad a la que se instalan puede ser variable dependiendo de las características del suelo. Estos electrodos son una solución

rápida, económica, versátil y de muy buen resultado para un sistema de puesta a tierra de baja tensión, computación (INTELEC, 2017). En la figura 16 se muestra un electrodo químico dispuesto verticalmente enterrado en el suelo.

Figura G 16: Electrodo químico



Fuente: (INTELEC, 2017)

Estos electrodos pueden ser de 2, 3 o 4 pulgadas de cobre, dependiendo de los espesores y resistividades de las diferentes capas del terreno, estas barras se rellenan con sales solubles de bajas resistividades las que salen al exterior del tubo por perforaciones en todos los lados de este a lo largo de su estructura, con lo que se consigue una mejor resistividad debido a que las raíces logradas con las sales de baja resistividad alcanzan una superficie mayor. No se recomienda instalar estos electrodos en zonas costeras o lugares que ofrezcan alta corrosión al cobre (INTELEC, 2017).

Disposición de las varillas copperweld determinadas por el NEC ecuatoriano

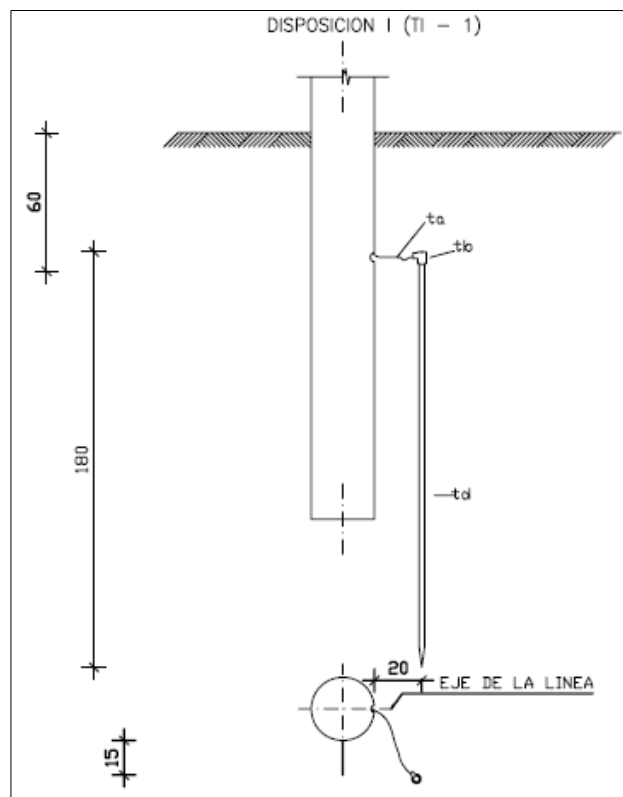
La varilla recomendada por normas nacionales para los sistemas de puestas a tierra

para redes aéreas y la instalación de transformadores eléctricos de distribución para proyectos eléctricos es la varilla Copperweld, de 0,016m de diámetro y 1,80m de longitud, el valor máximo de resistencia de puesta a tierra establecido por las normativas ecuatorianas es de 25 Ohmios.

Disposición 1 (T1 – 1) (1 Varilla enterrada verticalmente)

En la figura 17 se muestra la disposición de una varilla copperweld enterrada verticalmente establecida por la norma ecuatoriana (EEQUITO, 2014).

Figura G 17: Varilla dispuesta verticalmente

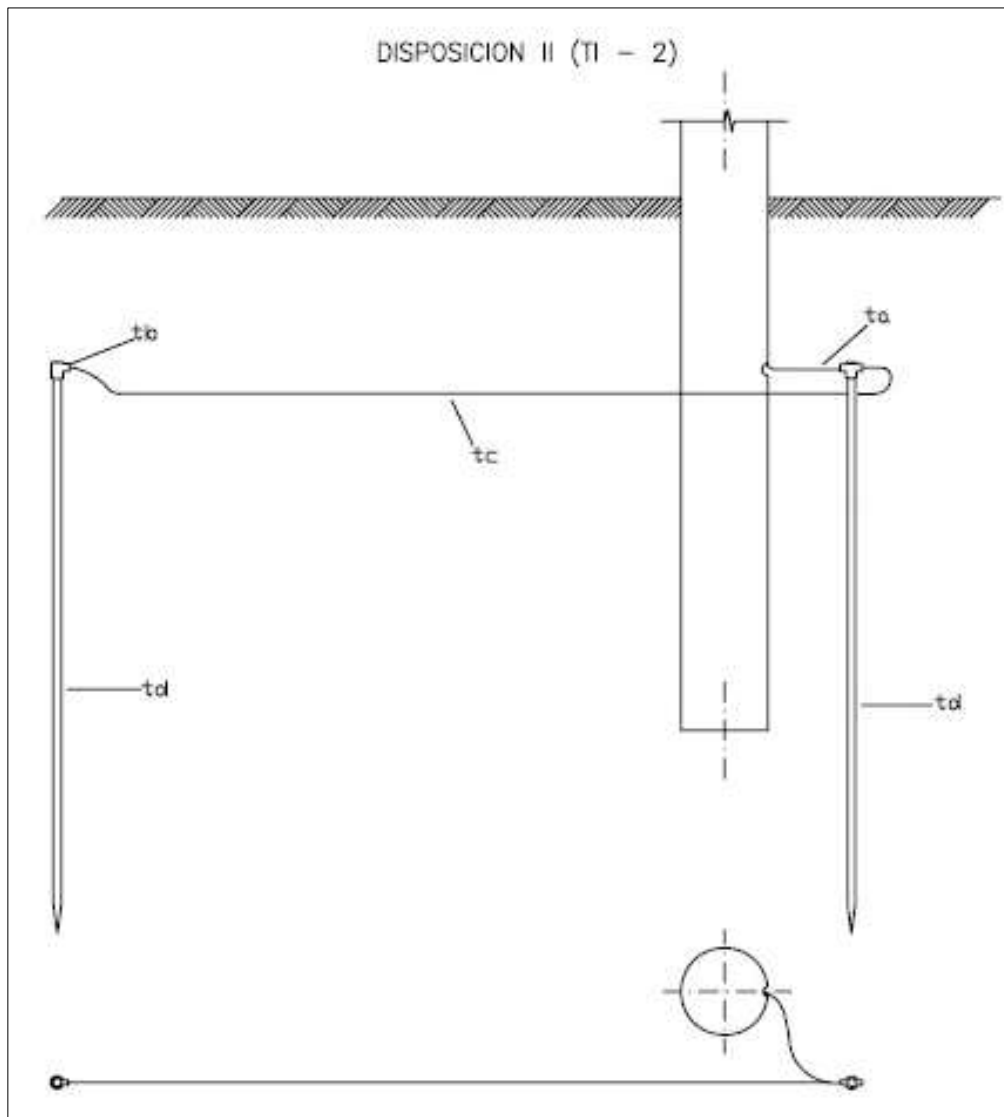


Fuente: (EEQUITO, 2014)

Disposición 2 (T1 – 2) (2 Varillas enterradas verticalmente dispuestas en línea)

En la figura 18 se muestra la disposición de dos varillas copperweld dispuestas en línea enterradas verticalmente establecida por la norma ecuatoriana. (EEQUITO, 2014).

Figura G 18: Disposición dos varillas verticales

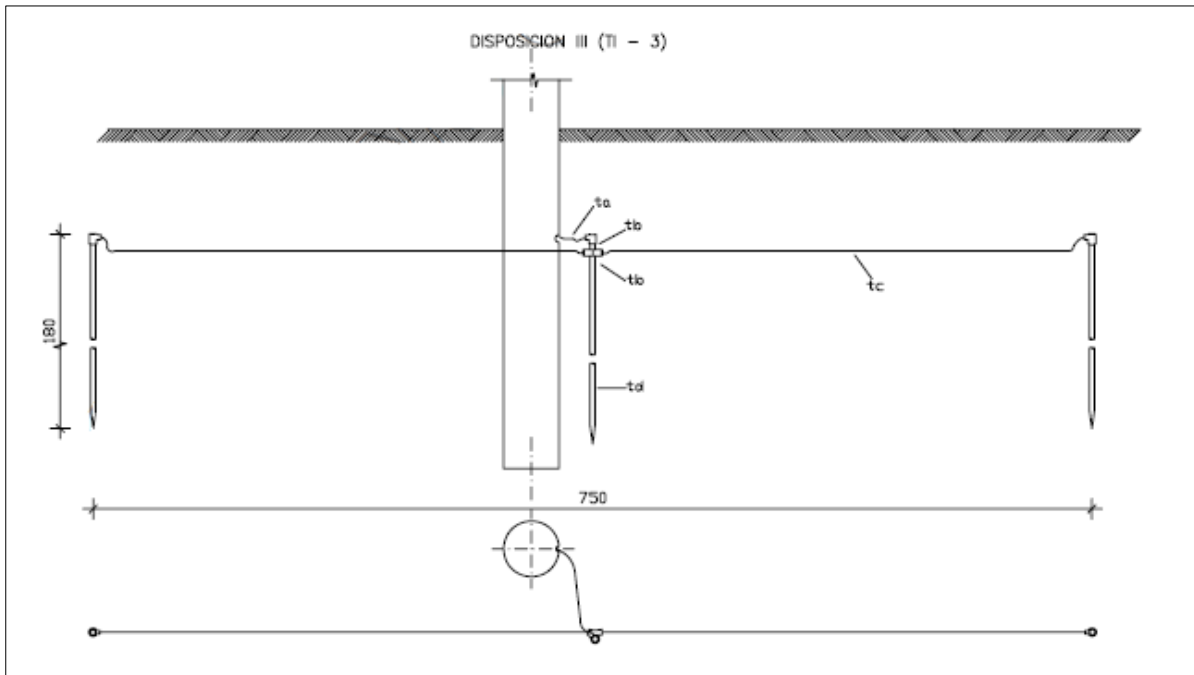


Fuente: (EEQUITO, 2014)

Disposición 3 (T1 - 3) (3 Varillas enterradas verticalmente dispuestas en línea)

En la figura 19 se muestra la disposición de tres varillas copperweld dispuestas en línea enterradas verticalmente establecida por la norma ecuatoriana (EEQUITO, 2014).

Figura G 19: Disposición 3 varillas verticales



Fuente: (EEQUITO, 2014)

Resistividades máximas permitidas para las disposiciones de puestas a tierra establecidas por el NEC Ecuatoriano

Para el cálculo de la resistividad máxima de cada disposición de las puestas a tierra detalladas en la normativa ecuatoriana, se utilizaron las formulas de la normativa IEC 60364-5-54), en la tabla 5 se muestra las resistividades máximas para cada disposición.

Tabla G 5: Resumen de las resistividades máximas permitidas para las disposiciones de puestas a tierra

Disposición	Resistividad Máxima [Ωm]
T1-1	45
T1-2	132.4
T1-3	292.3

Fuente: Autor

Equipo de medición (Telurometro)

En la figura 20 se muestra el equipo encargado para realizar sondeos eléctricos del suelo, también es utilizado para medir directamente la resistencia de los sistemas de puesta a tierra en los electrodos, la resistencia de puesta tierra la mide en ohmios y la resistividad del terreno en ohmios / metro.

Figura G 20: Probador de resistencia de tierra



Fuente: (Industrial, 2021)

Software para el diseño de puestas a tierra

Para realizar el diseño de una puesta a tierra se requiere un software que permita interpretar los datos obtenidos en campo, los cuales se obtienen mediante sondeos eléctricos, dicho esto a continuación se presentan dos herramientas informáticas de uso libre y gratuito que ayudan a continuar el proceso de diseño de una puesta a tierra.

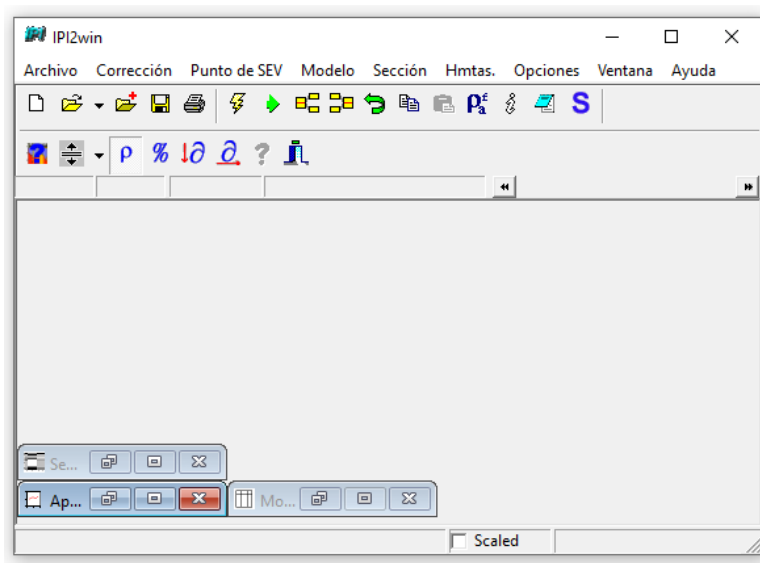
IPI2WIN

El IPI2WIN permite obtener un modelo estratificado del suelo, realiza interpretaciones de sondeos eléctricos verticales (SEV) a partir de datos obtenidos en campo mediante el método de Wenner y Schlumberger. Es un software desarrollado por la Moscow State University, Geological Faculty, Department of Geophysics.

Este programa es propuesto como ayuda a la solución técnica para el diseño de puestas a tierra de los transformadores de distribución, esta es una versión para universidades, pero puede ser utilizado por profesionales dedicados a la elaboración de proyectos eléctricos, ya que permite obtener modelos de suelos hasta de 30 capas. IPI2Win está diseñado para la interpretación automática o semi-automática de datos de sondeo eléctrico vertical obtenidos con varios de los arreglos utilizados con más frecuencia en la prospección eléctrica. IPI2Win puede ser corrido en cualquier computadora personal IBM compatible con sistema operativo Windows 95/98/NT/2000/XP/7 y10 (GEOSCAN, 2000).

IPI2Win está diseñado para la interpretación 1D de las curvas de sondeo eléctrico vertical a lo largo de un perfil. Se supone que el usuario es un interpretador con experiencia suficiente para resolver problemas geológicos y lograr el ajuste de las curvas de sondeos teórica y calculada. Su enfoque a la obtención de un resultado geológico en la característica que distingue a IPI2Win de otros programas populares de inversión automática. (GEOSCAN, 2000). En la figura 21 se muestra la pantalla de la interfaz del programa.

Figura G 21: Interfaz IPI2WIN



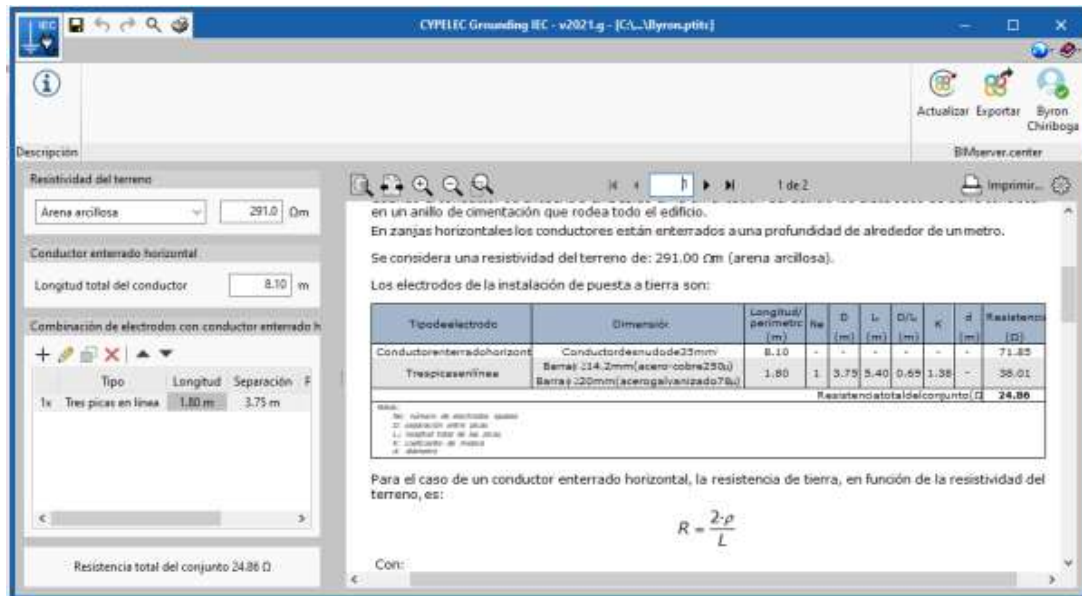
Fuente: (GEOSCAN, 2000)

CYPELEC Grounding IEC

CYPELEC Grounding IEC es una Aplicación gratuita que permite calcular la resistencia de puesta a tierra de las instalaciones eléctricas en base a la norma IEC 60364-5-54. El programa está integrado en el flujo de trabajo Open BIM a través de la plataforma BIMserver.center (CYPELEC, 2021).

En la figura 22 se muestra la interfaz del programa en ella podemos ingresar los datos para el cálculo de la resistencia aparente del suelo.

Figura G 22: Interfaz de programa CYPELEC Grounding IEC



Fuente: (CYPELEC, 2021)

H. FASES DEL PROCEDIMIENTO

Estos procedimientos se enfocan principalmente para realizar mediciones, análisis del terreno para un nuevo sistema de puesta a tierra

Para el procedimiento de adquisición e interpretación de datos se realizará en tres fases las cuales se describen a continuación:

Fase 1. Planificación y Preparación.

- Instruirse mediante lo explicado anteriormente en el apartado generalidades acerca del método de medición que se emplea en sondeos verticales (Método de Wenner).
- Estudiar el manual de usuario del telurómetro que utilizará acerca del funcionamiento del equipo para evitar daños intencionales.
- Planificar mediante un cronograma el día de la obtención de datos en campo.

- d) Preparar un formato hoja de registro para la toma de mediciones, en el anexo 1 se muestra un ejemplo de formato para registrar los datos obtenidos en campo.
- e) Preparar un listado de equipos y materiales para realizar el sondeo eléctrico vertical en el sitio donde se instalará el nuevo sistema de puesta tierra.
- f) Verificar que el telurómetro se encuentre en buenas condiciones y sus componentes completos, la batería debe encontrarse cargada completamente para no obtener medidas erróneas.

Fase 2. Sondeo eléctrico en Campo

Para realizar las mediciones en campo y efectuar adecuadamente cualquiera de los métodos de medición de la resistividad de los suelos antes descritos, se debe considerar:

- a) Verificar que no existan obstáculos en el área de medición de terreno y verificar la ausencia de otros objetos como tuberías rocas, árboles, edificaciones y establecer un centro de medición dispuesta en forma lineal para realizar las mediciones sin problemas.
- b) Realizar las mediciones en la situación más desfavorable posible para la conexión a tierra de las picas por ejemplo en días en los que el terreno se presente seco. En cambio, dado el caso de que el terreno se encuentre muy seco, lo recomendable humedecer los electrodos, especialmente el electrodo de corriente, para obtener un buen contacto entre el electrodo auxiliar y el terreno.
- c) En caso de que no se pueda realizar mediciones con longitudes grandes (Método de Schlumberger), entre el centro y el electrodo de corriente, se pueden realizar mediciones de hasta 20 metros, es recomendable recolectar tres lecturas, en al menos tres direcciones, para luego establecer un promedio de cada una de las lecturas.
- d) Establecer el área en donde se realizarán las mediciones de la resistividad del suelo, el sondeo eléctrico se realizará en el lugar donde se instalará el nuevo sistema de puesta a tierra.
- e) Preparar el equipo, herramientas y hoja de registro.

- f) Delimitar con cinta métrica las distancias entre electrodos para las mediciones y conectar los conductores en los electrodos dispuestos en forma horizontal.
- g) Encender el equipo y efectuar la medición, el resultado obtenido se procede a realizar el cálculo matemático mediante la fórmula de Wenner mencionada anteriormente para obtener la resistividad del terreno.
- h) Llevar el registro en la hoja de anotaciones, si es preciso realizar nuevamente la medición para obtener un valor de resistencia confiable.

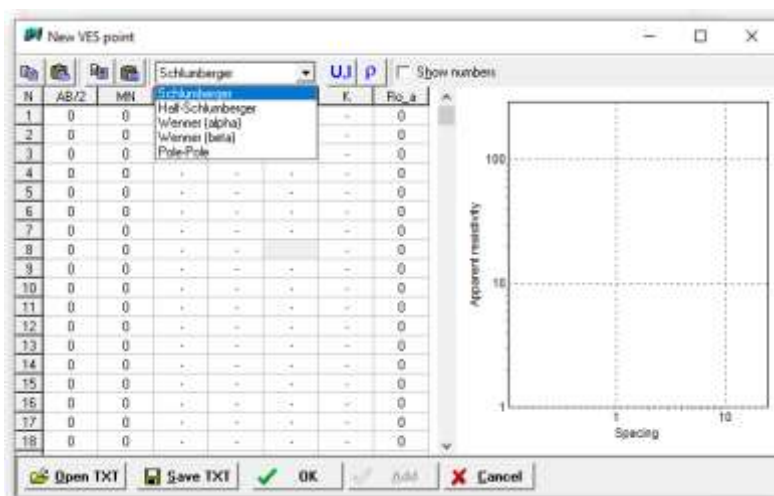
Fase 3. Interpretación de datos recolectados

Para interpretar los datos tabulados procedemos a la utilización de los programas mencionados en esta guía a fin de obtener resultados apropiados para el diseño de un sistema de puesta tierra a continuación se presentan los procedimientos de utilización del programa IPI2WIN y CYPELEC Grounding IEC.

Procedimiento de utilización Software IPI2WIN

Este programa permite introducir los datos obtenidos en campo, en la barra de herramientas archivo se selecciona la opción crear o en su efecto damos click en nuevo documento, en la figura 23 se muestra la pantalla donde ingresa los datos y se escoge el método de medición en campo utilizado.

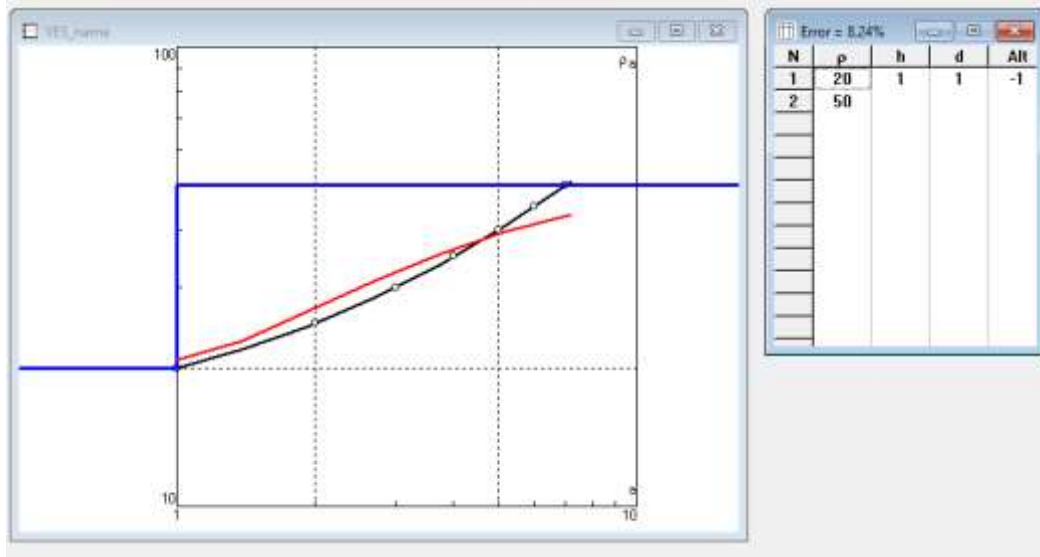
Figura G 23: Pantalla ingreso de datos



Fuente: (GEOSCAN, 2000)

Después de ingresar los datos de campo se guarda el archivo, se da click en OK y procede a mostrar una determinación del suelo en dos capas (curva roja) tal como se indica en la figura 24. El programa también muestra el porcentaje de error entre la curva de campo y el modelo.

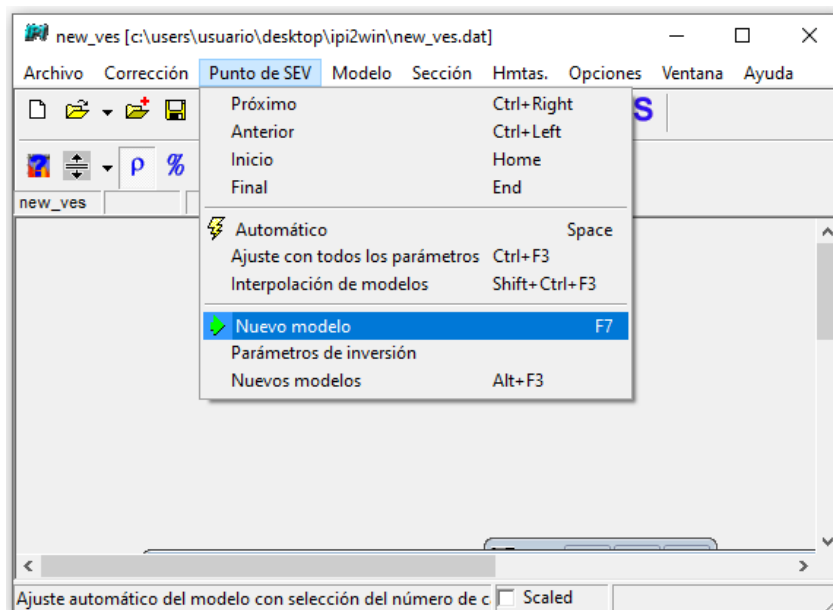
Figura G 24: Curva de resistividad y campo



Fuente: (GEOSCAN, 2000)

Se puede determinar un nuevo modelo con menor porcentaje de error, para ello se dirige hacia el menú “Punto de SEV”, opción Nuevo modelo véase figura 25.

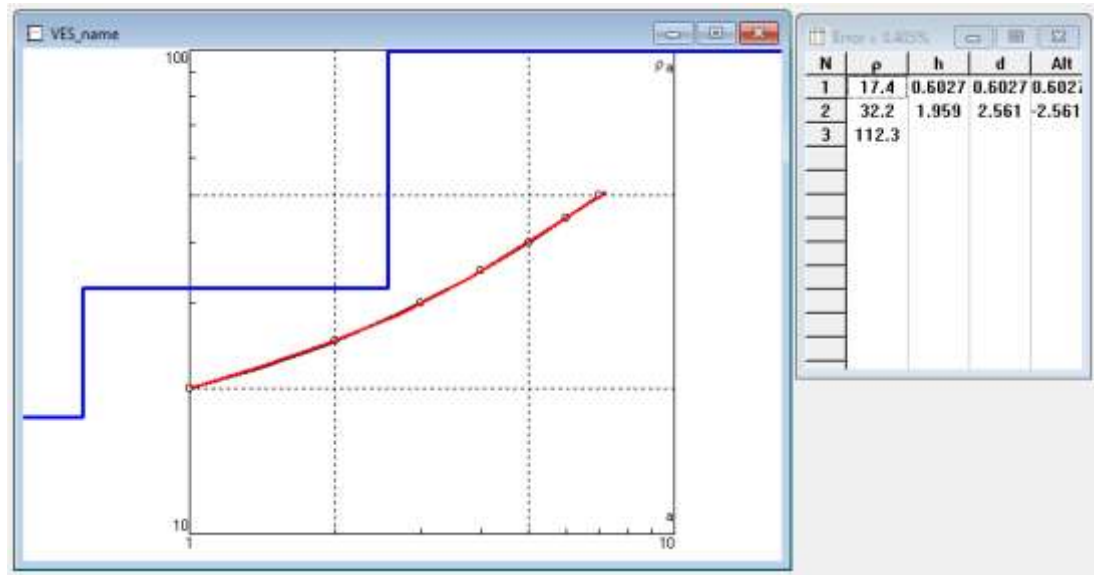
Figura G 25: Menú para nueva modelación



Fuente: (GEOSCAN, 2000)

El programa permite obtener un nuevo modelo con un error de aproximación mínimo y aceptable para continuar con el proceso de diseño de puesta a tierra, en la figura 26 se muestra el nuevo modelo determinado por el programa.

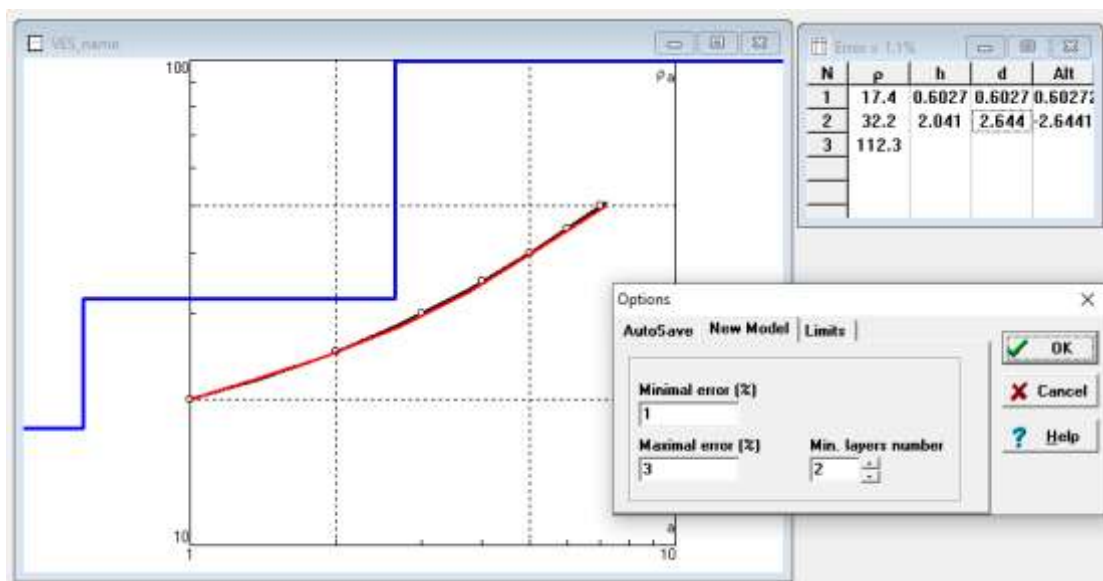
Figura G 26: Ajustes del nuevo modelo determinado por el programa



Fuente: (GEOSCAN, 2000)

El IPI2WIN también permite obtener modelos de más estratos, para lo cual se dirige a la opción "Punto de SEV", opción parámetros de inversión y se procede a configurar el número de capas véase figura 27.

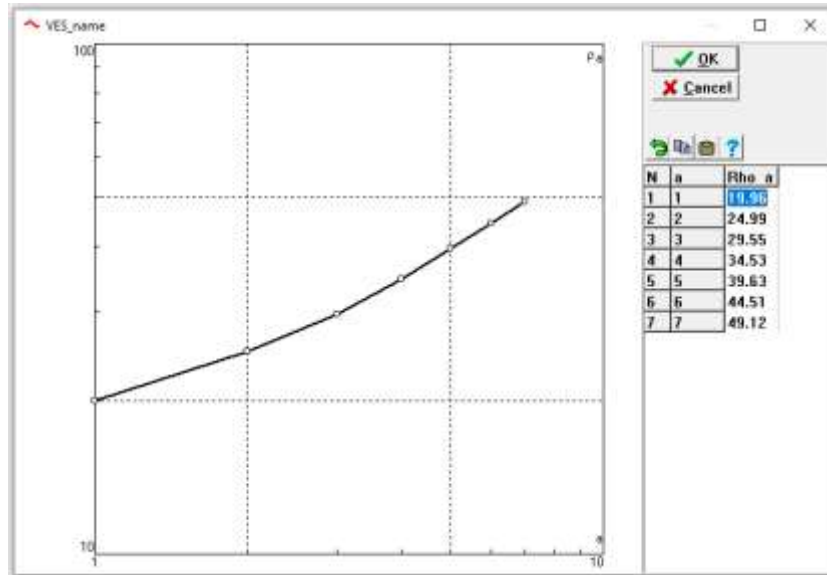
Figura G 27: Parámetros de inversión y elección de número de capas



Fuente: (GEOSCAN, 2000)

El Software permite visualizar la curva de campo de la resistividad del suelo dirigiéndose al menú opción Curva de campo la figura 28 muestra la curva de campo determinada por el software:

Figura G 28: Curva de campo de la resistividad del terreno



Fuente: (GEOSCAN, 2000)

El software IPI2WIN ayuda dentro de la rama eléctrica en la construcción de los sistemas de puestas a tierra, permite realizar el modelamiento del suelo de una manera rápida y eficaz, ayuda a conseguir las resistividades del suelo para futuras interpretaciones como el cálculo de la resistencia aparente del suelo.

En la figura 26 se muestra el cuadro de adquisición de datos en donde se encuentra distribuido las resistividades de las capas y sus respectivas alturas o espesores.

Procedimiento de cálculo de la resistencia aparente del suelo mediante CYPELEC Grounding IEC

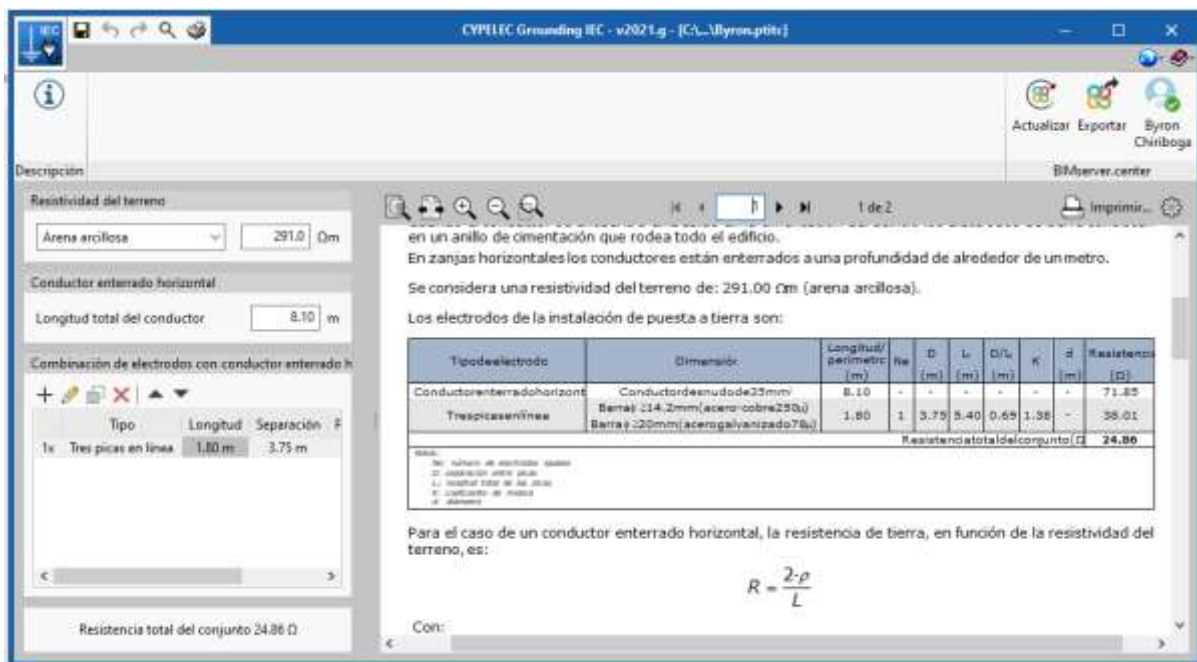
CYPELEC Grounding IEC es una herramienta gratuita que permite calcular la resistencia de puesta a tierra de las instalaciones eléctricas en base a la norma IEC 60364-5-54. El programa está integrado en el flujo de trabajo Open BIM a través de la plataforma BIMserver.center. (CYPELEC, 2021). La Norma IEC 60364-5-54 aborda las instalaciones de puesta a tierra y los conductores de protección incluyendo los conductores de equipotencialidad a fin de satisfacer la seguridad de la instalación eléctrica. El valor de la resistencia de puesta a tierra se obtiene especificando la resistividad del terreno, la longitud

total del conductor enterrado horizontal y las características de los electrodos de puesta a tierra definidos en la norma, pudiendo escoger entre:

- Pica vertical aislada
- Dos picas en línea
- Tres picas en línea
- Tres picas en triángulo
- Cuatro picas en línea
- Cuatro picas en cuadrado
- Placa enterrada vertical
- Pilar metálico

En la figura 29 se muestra la interfaz del programa en ella podemos ingresar los datos para el calculo de la resistencia aparene del suelo.

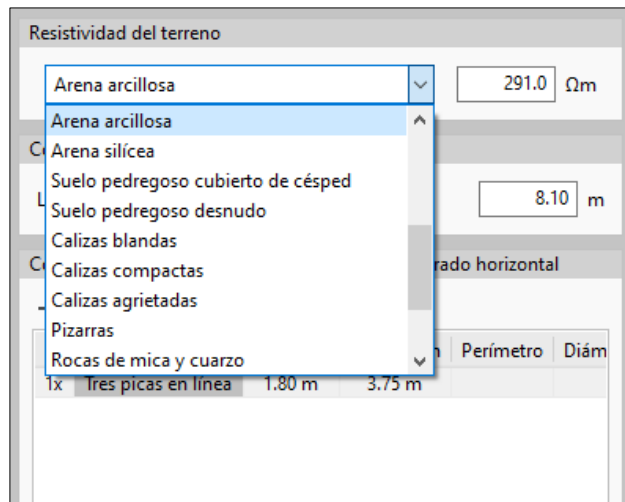
Figura G 29: Interfaz de programa CYPELEC Grounding IEC



Fuente: (CYPELEC, 2021)

En la sección resistividad del terreno, se puede seleccionar el tipo de suelo y modificar el valor a nuestra conveniencia, el parámetro de la resistividad se obtiene mediante la ecuación del método de Wenner y las resistividades obtenidas por el programa IPI2WIN. En la sección longitud total del conductor se ingresa la cantidad de conductor total en metros (longitud del conductor enterrado horizontalmente) véase figura 30.

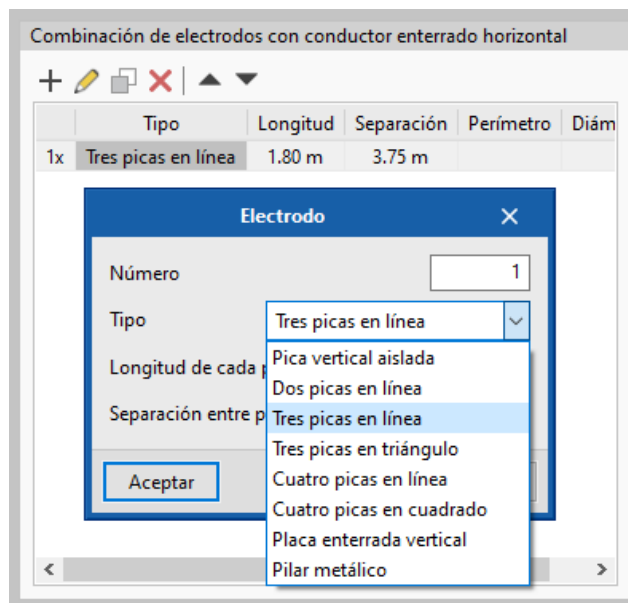
Figura G 30: Resistividad del terreno ingreso de datos



Fuente: (CYPELEC, 2021)

En la sección combinación de electrodos con conductor enterrado horizontalmente (figura 31), se elige la disposición del sistema de puesta a tierra, además se ingresa los datos de longitud de separación entre picas y la longitud de la varilla en metros.

Figura G 31: Combinación de electrodos con conductor enterrado horizontalmente



Fuente: (CYPELEC, 2021)

El programa realiza los respectivos cálculos aprobados por la norma IEC 60364-5-54 e indica el valor de la resistencia aparente del suelo, es preciso mencionar que el valor de la resistencia de puesta tierra debe estar dentro de los parámetros establecidos por las normativas ecuatorianas.

Una vez determinada la resistencia aparente del sistema de puesta a tierra, esta puede ser presentada para la elaboración de los proyectos eléctricos en la sección puestas a tierra del sistema, se sugiere anexar la hoja de registro y resultados que se encuentra en el anexo 1 y proceder a entregar el proyecto para revisión. En el anexo 3 se muestra un ejemplo demostrativo de los procedimientos antes mencionados y en el anexo 4 la hoja de registro y resultados de esta metodología.

I. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COMPRAS P. (2020). *ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE MATERIALES POSTES*. Obtenido de <https://bit.ly/3iDCitv>
- CYPELEC. (2021). *CYPELEC Grounding IEC*. . Obtenido de <http://cypelec-grounding-iec.cype.es/>
- Dehn & Söhne. (2007). *MANUAL DE PROTECCION CONTRA RAYOS*. Obtenido de <https://bit.ly/3zl55ZL>
- EEQUITO. (2014). *Normas para sistemas de distribución parte A*. Obtenido de <https://bit.ly/3cbrJd7>
- EEQUITO. (2014). *Normas para sistemas de distribución parte B*. Obtenido de <http://ftp.eeq.com.ec/upload/informacionPublica/2014/NormasparaSistemasdeDistribucionParteB.pdf>
- ELECTROCABLES. (2018). *Conductor de cobre desnudo. Sólidos y cableados*. Obtenido de <https://www.electrocable.com/uploads/product/conductores-de-cobre-conductores-de-cobre-desnudo.pdf>
- ELECTROCABLES. (2018). *Conductores Eléctricos, Cobre desnudo*. Obtenido de <https://www.electrocable.com/index.php/es/categorias-productos/construccion/cobre/cobre-desnudo.html>
- EPM. (2008). *MEDIDA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO*. Obtenido de NORMAS TÉCNICAS RA6-014: <https://bit.ly/3y4NYKT>
- ERICO. (2021). *nVent ERICO GEM. Material de Refuerzo de Tierra*. Obtenido de <https://www.erico.com/catalog/literature/E978B-LASP.pdf>
- GEOSCAN. (2000). *IPI2Win, Guia de usuario*. Obtenido de http://geophys.geol.msu.ru/demo_exe/WIPI_OM2.PDF
- GEOSEISMIC. (2017). *MÉTODOS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA SEV TIPO WENNER Y SCHLUMBERGER*. Obtenido de <http://www.geoseismic.cl/metodos-resistividad-electrica-sev/>
- IE2MMO. (2017). *Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra*. Obtenido de <https://ie2mmo.files.wordpress.com/2017/09/telu9.png>

- IEEE. (2000). *Std 80-2000 IEEE Guide for Safety in in AC Substation Grounding*. Obtenido de <https://bit.ly/2RPh8gv>
- IEEE. (2012). *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*. Obtenido de 10.1109 / IEEESTD.2012.6392181
- IEEE. (2015). *Std 80-2013 IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System*. Obtenido de <https://bit.ly/3fvyo2L>
- Industrial, M. (2021). *PROBADOR DE RESISTENCIA DE TIERRA DIGITAL INDUSTRIAL CEM DT-5300 OHM DC / AC VOLTÍMETRO*. Obtenido de https://cdn.shopify.com/s/files/1/1479/9364/products/000423_4_3_large.jpg?v=1473883456
- INEN. (2018). *INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN*. Obtenido de <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/CPE-19.pdf>
- INTELEC. (2017). *Intelec. Barras Químicas*. Obtenido de <http://www.intelecltda.cl/productos/quimica/index.html>
- KINDERMAN, G. (2010). *Aterramiento Eléctrico*. Perú: Geraldo Kindermann.
- KINDERMANN, G. (2020). *A-601 RESISTIVIDADE APARENTE DO SOLO PARA CALCULO DE ATERRAMENTO*. Obtenido de UNIVERSIDADE DA ELÉTRICA - IPT ENGENHARIA: <https://www.youtube.com/watch?v=Yp9-U-WdAx8>
- LOKE, M. H. (1999). *A practical guide to 2-D and 3-D surveys* . Obtenido de <https://pages.mtu.edu/~ctyoung/LOKENOTE.PDF>
- MENDOZA, R. V. (2001). *CURSO BASICO MALLAS DE TIERRA CONCEPTOS FUNDAMENTALES*. Obtenido de <https://bit.ly/3uXMRKI>
- Perez, W., Serrano, C. & Surio, O. (2015). *Manual de aplicación de la norma IEEE Std 81 para líneas y subestaciones eléctricas de transmisión*. Obtenido de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/9008/1/Manual%20de%20aplicaci%C3%B3n%20de%20a%20norma%20IEEE%20Std%2081.pdf>
- SEBATELEC. (2021). *TRATAMIENTO DEL SUELO GEM 25A*. Obtenido de http://sebatelec.com/uploads/products/2019/01/ficha_1547844788_1547844791.pdf

J. ANEXOS

ANEXO 1. HOJA DE REGISTRO DE MEDICIONES

HOJA DE REGISTRO DE SONDEOS ELÉCTRICOS PARA EL DISEÑO DE PUESTAS A TIERRA						
EMPRESA						
NOMBRE DEL PROYECTO						
PROVINCIA		NÚMERO DE POSTE				
CANTÓN		COORDENADAS				
PARROQUIA		ESTADO DEL TERRENO				
DISEÑADOR		ESTADO DEL CLIMA				
FECHA		CENTRO DE TRANSFORMACIÓN				
EQUIPO Y MÉTODO DE MEDICIÓN APLICADO						
Telurómetro Marca						
Método de Medición						
DATOS TABULADOS						
Nro. de medida	Distancia entre electrodos (a)	Resistencia en Ohms obtenida del Telurómetro		Resistividad del terreno ($2\pi a^2 R$)		
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS						
RESISTIVIDAD TEÓRICA OBTENIDA MEDIANTE SOFTWARE Y FÓRMULA	NRO. DE CAPAS	RESISTIVIDAD	ESPESOR	RESISTENCIA TEÓRICA DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA OBTENIDA MEDIANTE SOFTWARE Y FÓRMULA		
RESULTADOS						
DATOS			OBSERVACIONES			
RESISTIVIDAD TOTAL						
RESISTENCIA APARENTE						
ESPESOR						
DISPOSICIÓN DE VARILLAS COPPERWELD A INSTALAR						
GEL QUÍMICO	SI		NO			
RECOMENDACIONES			PERSONAL DE INTERVENCIÓN			
			DISEÑADOR			
			TRABAJADOR 1			
			TRABAJADOR 2			

ANEXO 2. CALIBRES DE CONDUCTORES DESNUDOS PARA SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

CONDUCTOR					Peso Total Aprox (kg/km)	SEMIDURO		SUAVE	Capacidad de Corriente (A)*
CALIBRE (AWG o kcmil)	Sección Transversal (mm ²)	No. Hilos	Clase de Trenzado	Diámetro del conductor (mm)		Carga de Rotura (kgf)	Resistencia C.C. a 20°C (ohm/km)	Resistencia C.C. a 20°C (ohm/km)	
FORMACIÓN SÓLIDO									
14	2.08	1	Solido	1.63	18.49	76	8.49	8.45	35
12	3.31	1	Solido	2.05	29.43	119	5.33	5.31	45
10	5.261	1	Solido	2.59	46.77	187	3.36	3.343	68
8	8.37	1	Solido	3.264	74.38	292	2.11	2.102	95
6	13.3	1	Solido	4.12	118.24	461	1.34	1.323	129
FORMACIÓN CABLEADO CONCÉNTRICO									
14	2.08	7	B	1.84	18.71	69	8.603	8.46	35
12	3.31	7	B	2.32	29.78	110	5.412	5.35	45
10	5.261	7	B	2.93	47.33	175	3.401	3.35	68
8	8.37	7	B	3.70	75.28	277	2.151	2.10	95
6	13.3	7	B	4.66	119.66	435	1.354	1.32	129
4	21.15	7	B	5.88	190.28	683	0.851	0.830	170
2	33.62	7	B	7.42	302.47	1070	0.536	0.522	230
1	42.4	7	A	8.33	381.46	1340	0.428	0.413	275
1/0	53.5	7	AA, A	9.36	481.23	1681	0.337	0.328	319
1/0	53.5	19	B	9.46	481.23	1722	0.337	0.328	319
2/0	67.4	7	AA, A	10.51	606.74	2105	0.267	0.261	371
2/0	67.4	19	B	10.63	606.74	2161	0.267	0.261	371
3/0	85.0	19	B	11.94	764.90	2715	0.212	0.207	427

Fuente: (ELECTROCABLES, 2018)

ANEXO 3. EJEMPLO DEL MÉTODO PROPUESTO EN EL ÁMBITO TÉCNICO

En la figura 32 se observa el lugar de la ejecución del proyecto eléctrico, el trabajo consistió en el montaje de un transformador monofásico de 15 Kva para un conjunto habitacional del sector, la condición del terreno fue normal y la condición ambiental fue soleado, la obtención de datos se realizó a 0.60 m de profundidad mediante el método de Wenner, para la instalación del sistema de puesta tierra se consideró las disposiciones de instalación según las normativas ecuatorianas. Se consideró inicialmente la instalación de una varilla y según fuera necesario aumentar el número de electrodos para llegar al límite de resistencia de puesta a tierra permitido por la normativa ecuatoriana de 25 ohmios.

Figura G 32: Obtención de datos en campo proyecto eléctrico



Fuente: Autor

Los datos tabulados se muestran a continuación:

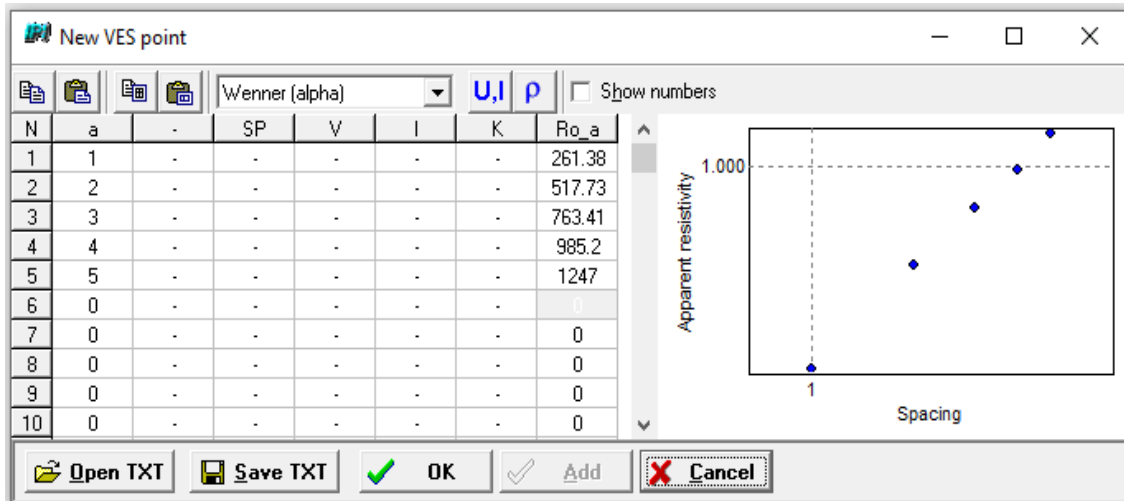
Figura G 33: Datos tabulados del proyecto eléctrico

Nro. de medición	Distancia entre electrodos (a)	Resistencia en Ohms obtenida del Teluometro	Resistividad del terreno ($\rho = 2 \pi aR$)
1	1	41,6	261,38
2	2	41,2	517,73
3	3	40,5	763,41
4	4	39,2	985,20
5	5	39,7	1247,21

Fuente: Autor

Los valores de la resistividad del terreno tabulados por el método de Wenner se introdujeron en el programa IPI2WIN véase figura 34.

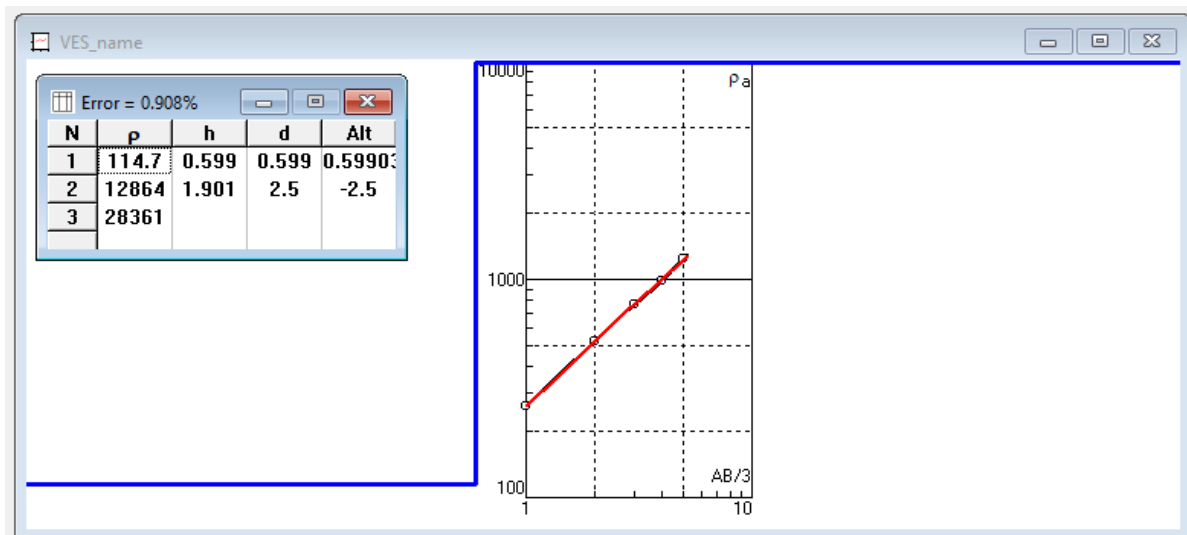
Figura G 34: Datos ingresados proyecto eléctrico



Fuente: Autor

Se realizó el ajuste para el programa determine un mejor modelo con un porcentaje menor de error, en la figura 35 se muestra el nuevo modelo determinado por el software:

Figura G 35: Nuevo modelo en dos capas proyecto eléctrico



Fuente: Autor

Mediante este modelo se redujo mediante la fórmula de Hummel para de obtener la resistividad total del terreno, la reducción de capas se la realizó mediante la ecuación 1 de esta guía tal como se muestra a continuación:

$$\rho\alpha = \frac{L_1 + L_2}{\frac{L_1}{\rho_1} + \frac{L_2}{\rho_2}}$$

Remplazando los valores:

$$\rho\alpha = \frac{0.599 + 1.901}{\frac{0.599}{114.43} + \frac{1.901}{12864}} = 464.48 \Omega \cdot m$$

Calculo de espesor:

$$d_{eq} = d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n = \sum_{i=1}^n d_t$$

Remplazando los valores tenemos:

$$d_{eq} = 0.599 + 1.901 = 2.5m$$

Se obtuvo 464.48 $\Omega \cdot m$ de resistividad aparente del terreno por el método de Wenner y con un espesor de 2.5 m. Se calculó la resistencia aparente despejando de la ecuación:

$$\rho = 2 * \pi * a * R \quad ; \quad R = \frac{\rho}{2\pi * a}$$

$$R = \frac{464.48}{2\pi * 2.5} = 29.57 \Omega$$

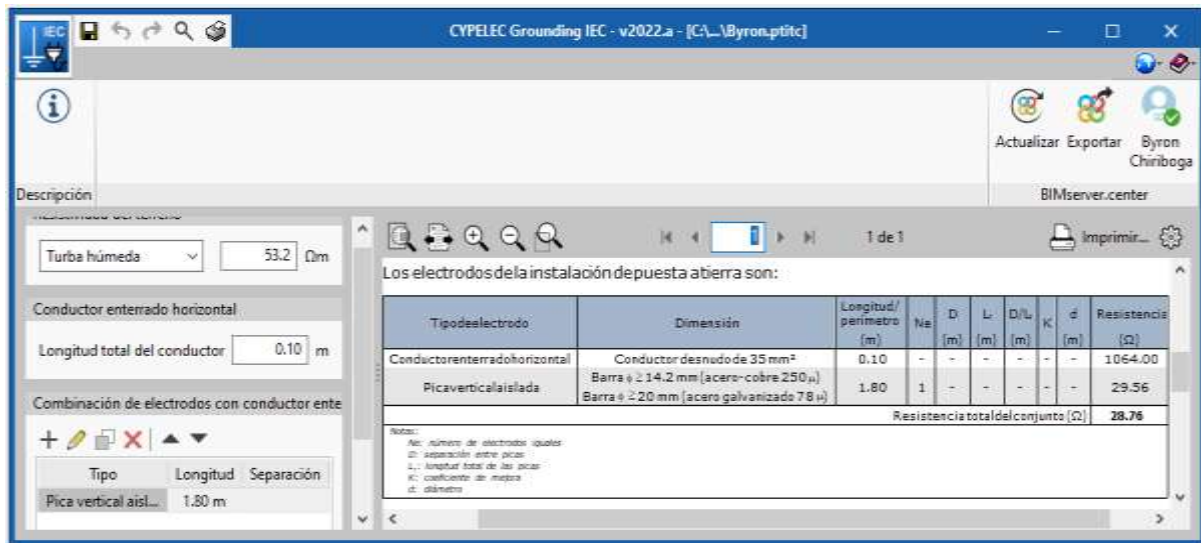
Se calculó la resistividad despejando de la formula determinada por la IEC:

$$\rho = R * L$$

$$\rho = 29.57 * 1.8 = 53.226 \Omega m$$

Obtenido este parámetro de resistividad aparente y mediante el software CYPELEC Grounding IEC, se determinó cálculo teórico de la resistencia del sistema de puesta a tierra tal como se indica en la figura 36.

Figura G 36: Cálculo teórico de la resistencia aparente proyecto eléctrico para una varilla instalada



Fuente: Autor

Como se observa en la figura 36 se ingresó el parámetro de la resistividad aparente, luego se seleccionó el tipo de suelo y se consideró la longitud total del conductor de 0.10 m para el cálculo de una varilla proyectada a instalarse en ese lugar, el resultado total obtenido mediante el programa fue de 28.76 Ω de resistencia, sin embargo, se consideró el valor de 29.56 Ω para el cálculo de solo la varilla para el diseño. El valor de resistencia aparente obtenido se procedió a la verificación en campo a través del uso del Telurómetro. La medición de una varilla copperweld de 1,80 metros enterrada indicó una lectura de 30.8 Ω (Véase figura 36).

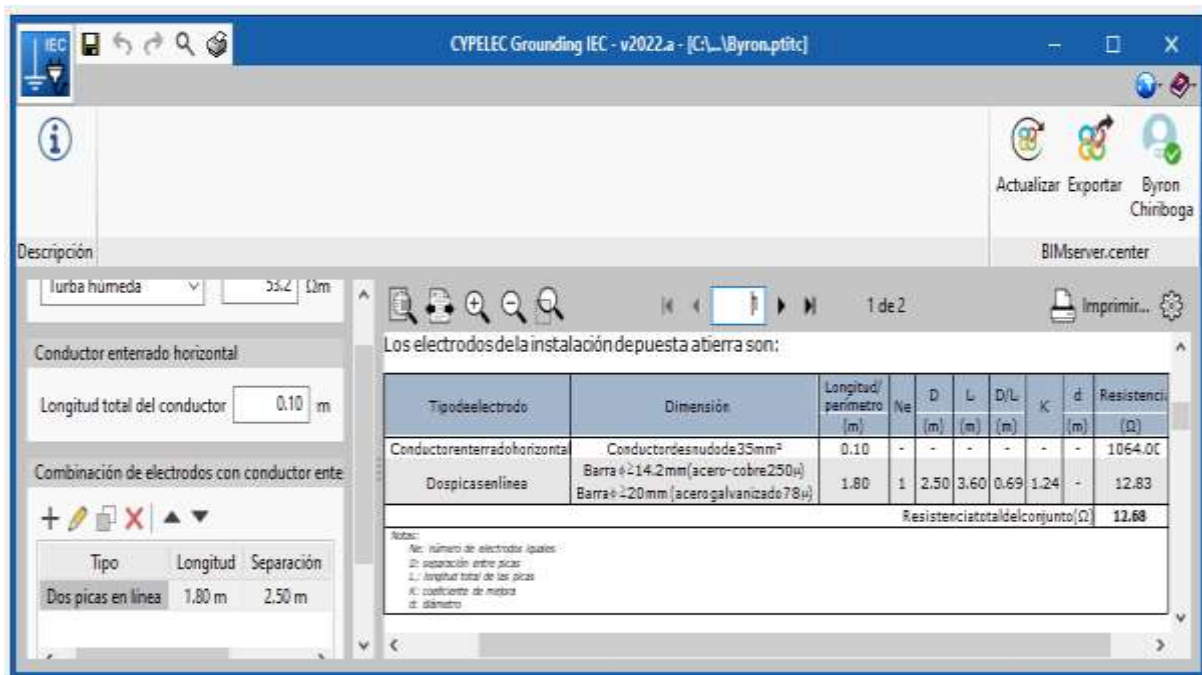
Figura G 37: Resistencia de una varilla instalada



Fuente: Autor

Como se observa en la figura 37 la resistencia de puesta a tierra de la varilla copperweld instalada no cumple con la normativa vigente debido a que el valor máximo permitido para construcciones de redes eléctricas aéreas es de 25Ω , una vez que se determinó estos parámetros y obtenida la resistividad aparente también se realizó el cálculo mediante el programa CYPELEC Grounding IEC para la disposición 2 (T1 – 2) (2 Varillas enterradas verticalmente dispuestas en línea), en la figura 38 se muestra el cálculo teórico de la resistencia aparente para dos varillas en línea:

Figura G 38: Cálculo teórico de la resistencia aparente proyecto eléctrico para dos varillas en línea



Fuente: Autor

Como se observa en la figura 38 se ingresó el parámetro de la resistividad aparente y se eligió el tipo de suelo, se ingresó la longitud total del conductor de 2.50 m que fue la separación entre varillas como resultado total obtenido mediante el programa fue de 12.68Ω de resistencia, sin embargo, se consideró el valor de 12.83Ω para el cálculo de dos picas en línea.


El valor obtenido con la ayuda del software se procedió a la verificación en campo mediante el Telurómetro. La medición obtenida por el equipo para la disposición 2 (T1 – 2) (2 Varillas enterradas verticalmente dispuestas en línea) instalada en el terreno indicó una lectura de 13.2Ω mediante este procedimiento se determinó que es una lectura aproximada al valor calculado (véase figura 39).

Figura G 39: Resistencia de disposición dos varillas instaladas en línea



Fuente: Autor

ANEXO 4. HOJA DE REGISTRO DEL EJEMPLO DEMOSTRATIVO

HOJA DE REGISTRO DE SONDEOS ELÉCTRICOS PARA EL DISEÑO DE PUESTAS A TIERRA					
EMPRESA					
NOMBRE DEL PROYECTO: MONTAJE DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE 15 KVA					
PROVINCIA: Imbabura			NÚMERO DE POSTE		
CANTÓN: Ibarra			COORDENADAS		
PARROQUIA: El Sagrado			ESTADO DEL TERRENO: Humedo		
DISEÑADOR: Byron Chiriboga			ESTADO DEL CLIMA: Soleado		
FECHA: 03-08-2021			CENTRO DE TRANSFORMACIÓN: 15 Kva		
EQUIPO Y MÉTODO DE MEDICIÓN APLICADO					
Telurómetro Marca: CEM DT - 5300					
Método de Medición: Wenner					
DATOS TABULADOS					
Nro. de medida	Distancia entre electrodos (a)	Resistencia en Ohms obtenida del Telurómetro	Resistividad del terreno (2*π*a*R)		
1	1 m	41.6 Ω	261.38		
2	2 m	41.2 Ω	517.43		
3	3 m	40.5 Ω	763.41		
4	4 m	39.2 Ω	983.20		
5	5 m	39.7 Ω	1247.21		
6					
7					
8					
9					
10					
INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS					
RESISTIVIDAD TEÓRICA OBTENIDA MEDIANTE SOFTWARE Y FÓRMULA	NRO. DE CAPA	RESISTIVIDAD	ESPESOR	RESISTENCIA TEÓRICA DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA OBTENIDA MEDIANTE SOFTWARE Y FÓRMULA	
	1	114.75 Ω/m	0.399		
	2	12814 Ω/m	1.901		
	3				
<p>Calculo para 1 pica. $P = 2\pi a R; R = \frac{\rho}{2\pi a}$</p> <p>$R = \frac{464.48}{2 \cdot \pi \cdot 2.5} = 29.57 \Omega$</p>					
<p>$\rho = \frac{R \cdot 2\pi a}{1} = \frac{0.399 + 1.901}{\frac{1}{114.75} + \frac{1}{12814}} = 464.48 \Omega \cdot m$ $q = 0.399 + 1.901$ $\rho = R \cdot a = 29.57 \cdot 1.8 = 53.226 \Omega/m$ $a = 2.5 m$</p> <p>Resistencia aparente mediante software para disposición de varillas en línea $R = 12.83 \Omega$</p>					
RESULTADOS					
DATOS			OBSERVACIONES		
RESISTIVIDAD TOTAL	53.226 Ω/m		Determinada mediante metodología IEC 60364-5-54		
RESISTENCIA APARENTE	12.83 Ω				
ESPESOR	2.5 m				
DISPOSICION DE VARILLAS COPPERWELD A INSTALAR	Dos picos en línea				
GEL QUÍMICO	SI		NO	X	
RECOMENDACIONES			PERSONAL DE INTERVENCIÓN		
			DISEÑADOR		
			TRABAJADOR 1		
			TRABAJADOR 2		