



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y SISTEMAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA



**“PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE PUESTA
A TIERRA DEL HOSPITAL REGIONAL MANUEL NÚÑEZ
BUTRÓN PUNO, MEDIANTE TRATAMIENTO
ELECTROQUÍMICO”**

TESIS

PRESENTADA POR:

ROSWALDO LIPA QUISPE

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

PUNO – PERÚ

2023



Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DEL HOSPITAL REGIONAL MANUEL NÚÑEZ BUTRÓN PUNO, MEDIANTE TRATAMIENTO ELECTROQUÍMICO

AUTOR

ROSWALDO LIPA QUISPE



Ing. Julio Freddy Chura Acera
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
C.I.P. 135145
Sub. Dirección de Investigación

RECUENTO DE PALABRAS

13091 Words

RECUENTO DE CARACTERES

71856 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

95 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

3.6MB

FECHA DE ENTREGA

May 4, 2023 11:25 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

May 4, 2023 11:26 PM GMT-5

● 17% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 16% Base de datos de Internet
- 3% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de Crossref
- Base de datos de contenido publicado de Crossref
- 6% Base de datos de trabajos entregados

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 12 palabras)



Marcos Jose Villanueva Carnejo
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
C.I.P. 99153

Resumen



DEDICATORIA

A mis padres, mi familia, amigos y a mis docentes universitarios que me apoyaron a ser mejor cada día y a la Universidad Nacional del Altiplano por acogerme y formarme para mejorar profesionalmente.

Al jefe y personal del área de servicios generales y mantenimiento del hospital Manuel Núñez Butrón de la ciudad de Puno por concederme el espacio dentro del recinto para poder llevar a cabo este proyecto.

Roswaldo Lipa Quispe



AGRADECIMIENTO

Primeramente, gracias a nuestro creador, a la familia, a los docentes de escuela profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Nacional Del Altiplano de Puno por el constante apoyo y motivación para afrontar los diversos retos que el estudiar implica, porque cada esfuerzo es un sacrificio, porque cada paso es un compromiso, de todo cariño y aprecio gracias a todos.

Roswaldo Lipa Quispe



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 12

ABSTRACT..... 13

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. HIPÓTESIS..... 15

1.1.1. Hipótesis general..... 15

1.1.2. Hipótesis específico 16

1.2. OBJETIVOS 16

1.2.1. Objetivo general..... 16

1.2.2. Objetivos específicos 16

1.3. VARIABLES 16

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA 17

2.1.1. Precisiones del sistema 17

2.2. COMPONENTES DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA 18

2.2.1. Los conductores de tierra 19

2.2.2. Las varillas de tierra..... 20



2.2.3. Corrosión de la varilla.....	22
2.2.4. Conectores.....	22
2.2.5. Resistencia de conexión a tierra.....	23
2.2.6. Resistividad del suelo	25
2.3. EFECTOS AMBIENTALES	27
2.4. MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO	29
2.4.1. Métodos de medición	31
2.5. MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE TIERRA.....	35
2.5.1. Método de la pendiente	35
2.6. TRATAMIENTO DEL SUELO.....	37
2.6.1. Tratamientos Electroquímicos	37
CAPITULO III	
MATERIALES Y MÉTODOS	
3.1. MATERIALES	41
3.1.1. Tipo de investigación.....	41
3.2. MÉTODO	42
3.2.1. Estimación de la Resistividad del terreno.....	43
3.2.2. Estimación de la resistencia del sistema de puesta a tierra mediante tratamiento electroquímico.	51
CAPITULO IV	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1. ESTIMACIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO	53
4.1.1. Modelado del Suelo	63
4.2. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	79



4.3. INFLUENCIA DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA TRATADO ELECTROQUÍMICAMENTE	80
V. CONCLUSIONES.....	83
VI. RECOMENDACIONES	84
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
ANEXOS.....	88
ANEXO A: PANEL FOTOGRÁFICO	88
ANEXO B: CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DEL EQUIPO	89
ANEXO C: FICHA TÉCNICA DEL ADITIVO.....	91

Área: Eléctrica

Tema: Puesta a tierra

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 10 de mayo de 2023



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Componentes de la puesta a tierra.	19
Figura 2: Varilla de tierra.	21
Figura 3: Conector de tierra tipo AB.	23
Figura 4: Resistencia de tierra.	25
Figura 5: Variación de la resistividad por la humedad.	28
Figura 6: Variación de la resistividad por la temperatura.	28
Figura 7: Variación de la resistividad por las sales.	29
Figura 8: Método de medición de la resistividad.	30
Figura 9: Esquema de la varilla.	31
Figura 10: Sistema simétrico.	34
Figura 11: Curva de resistencia típica.	34
Figura 12: Método de Schlumberger.	35
Figura 13: Medición de la resistencia.	35
Figura 14: Grafica de caída de potencial.	36
Figura 15: Representación del método de caída de potencial.	36
Figura 16: Puesta a tierra tratada con sales	38
Figura 17: Puesta a tierra tratada químicamente.	39
Figura 18: Método de tratamiento.	40
Figura 19: Telurómetro MEGABRAS Modelo MTD-20KWe.	42
Figura 20: Método de los cuatro puntos.	43
Figura 21: Esquema de instalación.	43
Figura 22: Esquema de instalación del manual.	44
Figura 23: Esquema de instalación en campo.	45
Figura 24: Instalación del equipo.	45
Figura 25: Medida de la resistividad posición ρ (4 pole).	47
Figura 26: Suelo de dos capas.	48
Figura 27: Método gráfico de Sunde.	49
Figura 28: Esquema de instalación.	54
Figura 29: Esquema de instalación de los cables.	54
Figura 30: Resistividad aparente vs espaciamiento trayectoria 1.	56
Figura 31: Esquema de instalación de jabalinas trayectoria N°1.	56



Figura 32: Lectura del instrumento trayectoria N°1.....	57
Figura 33: Resistividad aparente vs Espaciamiento trayectoria 2.	58
Figura 34: Instalación de jabalinas trayectoria N°2.	59
Figura 35: Lectura del instrumento trayectoria N°2.....	59
Figura 36: Resistividad aparente vs Espaciamiento trayectoria 3.	60
Figura 37: Instalación de jabalinas trayectoria N°3.	61
Figura 38: Lectura del instrumento trayectoria N°2.....	61
Figura 39: Resistividad aparente vs Espaciamiento trayectoria 4.	62
Figura 40: Instalación de jabalinas trayectoria N°4.	63
Figura 41: Lectura del instrumento trayectoria N°4.....	63
Figura 42: Resistividad aparente vs espaciamiento trayectoria 1.....	64
Figura 43: Grafico de Sunde trayectoria 1.	65
Figura 44: Proyección de la altura trayectoria 1.....	66
Figura 45: Resistividad del terreno.....	67
Figura 46: Resistividad aparente vs espaciamiento trayectoria 2.....	68
Figura 47: Grafico de Sunde trayectoria 2.	69
Figura 48: Proyección de la altura trayectoria 2.....	70
Figura 49: Resistividad del terreno.....	71
Figura 50: Resistividad aparente vs espaciamiento trayectoria 3.....	72
Figura 51: Grafico de Sunde trayectoria 3.	73
Figura 52: Proyección de la altura trayectoria 3.....	74
Figura 53: Resistividad del terreno.....	75
Figura 54: Resistividad aparente vs espaciamiento trayectoria 4.....	76
Figura 55: Grafico de Sunde trayectoria 4.	77
Figura 56: Proyección de la altura trayectoria 4.....	78
Figura 57: resistividad del terreno.	79



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resistividad del terreno.	48
Tabla 2: Calculo de la Resistencia (R).	51
Tabla 3: Resistencia con revestimiento de cemento conductor.	52
Tabla 4: Resistividad aparente del terreno trayectoria 1.	55
Tabla 5: Resistividad aparente vs espaciamento trayectoria 2.	58
Tabla 6: Resistividad aparente vs espaciamento trayectoria 3.	60
Tabla 7: Resistividad aparente vs espaciamento trayectoria 4.	62
Tabla 8: Resistividad aparente del terreno trayectoria 1.	64
Tabla 9: Resistividad aparente del terreno trayectoria 2.	68
Tabla 10: Resistividad aparente del terreno perfil 3.	72
Tabla 11: Resistividad aparente del terreno trayectoria 4.	75
Tabla 12: Calculo de la Resistencia.	80
Tabla 13: Resistencia con tratamiento electroquímico.	81



ACRÓNIMOS

ρ_c	Resistividad del concreto en $\Omega \cdot m$.
ρ	resistividad del suelo en $\Omega \cdot m$.
D_c	diámetro de la cáscara de concreto en m.
d	diámetro de la varilla de tierra en m.
L_r	longitud de la varilla de tierra en m.
R_c	Resistencia de tierra en Ω
r	Radio del electrodo
l	Longitud de la varilla m
R_{CE-rod}	Resistencia producto del compuesto mejorador del suelo.



RESUMEN

En condiciones de falla, el flujo de corriente eléctrica a tierra produce gradientes potenciales dentro y alrededor del sistema de tierra. En tales condiciones, los gradientes potenciales máximos a lo largo de la superficie terrestre pueden ser de magnitud suficiente para poner en peligro a la persona y los equipos. La efectividad de los sistemas de puesta a tierra es de gran importancia para la protección de las personas y los equipos en las áreas hospitalarias, la constante alteración de patrones del sistema operativo de estos equipos biomédicos se debe a la sobrecarga y con ella la propiedad del buen funcionamiento disminuye. Existen métodos de tratamiento que pueden garantizar niveles óptimos y de calidad de la resistencia de los sistemas de puesta a tierra, el presente proyecto de tesis tiene como objetivo principal realizar la propuesta de mejoramiento del sistema de puesta a tierra del Hospital Regional Manuel Núñez Butrón mediante tratamiento electroquímico, como objetivos específicos es el estudio de la resistividad del terreno, y la propuesta de diseño del pozo a tierra mediante tratamiento electroquímico. La presente investigación es de tipo descriptiva correlacional puesto que se analiza los resultados sin manipular las variables correspondientes, como resultado la condición más desfavorable de 11.79 Ohmios y el promedio de la puesta a tierra tratada es 9.9 ohmios, con lo que se prueba la efectividad del tratamiento. El proyecto de investigación se encuentra ubicado en la Región de Puno, Provincia de Puno y Distrito de Puno, en las siguientes coordenadas: Latitud: -15.84; Longitud: -70.02; Elevación: 3830 m.s.n.m.

Palabras clave: Pozo a tierra, protección, resistividad, resistencia, tratamiento electroquímico.



ABSTRACT

Under fault conditions, the flow of electric current to ground produces potential gradients in and around the ground system. Under such conditions, the maximum potential gradients along the earth's surface can be of sufficient magnitude to endanger person and equipment. The effectiveness of grounding systems is of great importance for the protection of people and equipment in hospital areas, the constant failure of these biomedical equipment is due to overload and with it altered the pattern of the system losing the property of good performance. There are treatment methods that can guarantee optimal levels and quality of the resistance of the grounding systems, the main objective of this thesis project is to make a proposal to improve the grounding system of the Manuel Núñez Butrón Regional Hospital through electrochemical treatment, as specific objectives are the study of the resistivity of the ground, and the design proposal of the grounding well through electrochemical treatment. The present research is of a descriptive correlational type since the results are analyzed without manipulating the corresponding variables. As a result, the most unfavorable condition is 11.79 Ohms and the average of the treated grounding is 9.9 ohms, which proves the effectiveness of the treatment. The research project is located in the Region of Puno, Province of Puno and District of Puno, at the following coordinates: Latitude: -15.84; Longitude: -70.02; Elevation: 3830 meters above sea level.

Key words: Grounded well, protection, resistivity, resistance, electrochemical treatment.



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

El estudio planteado, se justifica en cuanto: las puestas a tierra de las instalaciones eléctricas y equipos es un tema que afecta a varias de las diferentes disciplinas implicadas en la construcción y en el equipamiento eléctrico de un centro hospitalario, centro comercial o industrial, y en las residencias el propósito principal es comprobar la influencia en el tratamiento de la puesta a tierra con aditivos electroquímicos.

El sistema de puesta a tierra de un sistema eléctrico puede desempeñar diferentes funciones (Manuel et al., 2019). Se diseña y construye para garantizar la seguridad del personal y de los equipos en caso de fallo de la red eléctrica o descargas atmosféricas (Kontargyri et al., 2015). Son de gran importancia para lograr la eficiencia del sistema de protección implicado con la consiguiente seguridad personal, en las redes eléctricas y en el sistema de protección (Gazzana et al., 2018). La resistividad de la tierra varía no sólo con el tipo de suelo, sino también con la temperatura, la humedad, las condiciones minerales, el clima y la compactación (S. Committee et al., 2012). Por lo tanto, para lograr una protección adecuada, es esencial implementar procedimientos técnicos para asegurar no sólo que los valores de resistencia del suelo medidos durante la implementación del sistema de puesta a tierra estén dentro de los límites establecidos por las normas, sino también que se mantengan dentro de estos límites (Luiz et al., 2015). El uso de compuestos mejoradores de tierra puede disminuir la resistencia de tierra y la impedancia de impulso de los sistemas a niveles muy bajos, de modo que las corrientes altas puedan dispersarse en la tierra de forma segura (Androvitsaneas et al., 2015).



En este proyecto de tesis se presenta una propuesta en el tema de las puestas a tierra que va a servir de guía básica para la realización de las puestas a tierra utilizando tratamientos químicos del terreno, el mismo que debería garantizar una resistividad de acuerdo con lo establecido en las normas y principalmente en el Código Nacional de Electricidad.

En cuanto a la protección de equipos los sistemas de puesta a tierra deben proteger los equipos eléctricos y electrónicos, facilitando una ruta de evacuación de baja impedancia a los equipos interconectados. La canalización, ordenación y el apantallamiento adecuado de los cables constituyen aspectos muy importantes y sirven para la producción de averías que podrían afectar el funcionamiento de los equipos.

El presente proyecto de tesis tiene como objetivo principal realizar la propuesta de mejoramiento del sistema de puesta a tierra del Hospital Regional Manuel Núñez Butrón mediante tratamiento electroquímico, como objetivos específicos es el estudio de la resistividad del terreno, y la propuesta de diseño del pozo a tierra mediante tratamiento electroquímico.

En ese sentido el presente proyecto de tesis se justifica en cuanto es necesario comprobar la influencia del aditivo electroquímico en el tratamiento de los pozos a tierra.

1.1. HIPÓTESIS

1.1.1. Hipótesis general

Con la propuesta de mejoramiento del sistema de Puesta a Tierra del Hospital Regional Manuel Núñez Butrón Puno, mediante tratamiento electroquímico se mejora significativamente la resistencia del pozo a tierra.



1.1.2. Hipótesis específico

- El estudio de la resistividad del terreno del Tierra del Hospital Regional Manuel Núñez Butrón permite analizar el comportamiento del sistema a tierra.
- La resistencia del sistema de puesta a tierra permite conocer la efectividad del tratamiento electroquímico del sistema de puesta a tierra.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Realizar la propuesta de mejoramiento del sistema de Puesta a Tierra del Hospital Regional Manuel Núñez Butrón mediante tratamiento electroquímico.

1.2.2. Objetivos específicos

- Calcular la resistividad según el estrato del terreno del Tierra del Hospital Regional Manuel Núñez Butrón.
- Estimar la resistencia del sistema de puesta a tierra del del Hospital Regional Manuel Núñez Butrón mediante tratamiento electroquímico.

1.3. VARIABLES

Las variables a ser analizadas son:

Independiente

Método de mejoramiento de puesta a tierra

Dependientes

Resistencia del pozo a tierra



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

La configuración de la puesta a tierra del sistema determina las sobretensiones que pueden producirse durante un fallo de línea a tierra. Un único fallo de línea a tierra desplaza la potencial de tierra en el lugar de la avería. En un sistema sólidamente conectado a tierra con una buena vía de retorno a la fuente de puesta a tierra, el desplazamiento de la referencia es mínimo. En un sistema sin conexión a tierra, se produce un desplazamiento completo.(Short, 2004)

2.1.1. Precisiones del sistema

Dependiendo del tipo de aplicación, los requisitos de los parámetros de puesta a tierra también varían, generalmente, tales funciones se asocian con el punto del que está conectado a la tierra por conductores eléctricos; por ejemplo, las conexiones del neutro del transformador de un sistema de distribución eléctrica a los electrodos instalados en el suelo, en la carcasa metálica de un equipo o en la pista de un circuito impreso de una placa digital, entre otros.(Manuel et al., 2019).

Para mantener a salvo los equipos en caso de sobrecarga, se aplica el mismo concepto de conexión única. La puesta a tierra en un solo punto es una técnica de puesta a tierra que une todos los equipos de un edificio y los conecta a tierra en un punto común. (Rand, 2000)

El sistema de puesta a tierra en un sistema eléctrico puede desempeñar diferentes funciones, los objetivos deseados cuando el recorrido de un punto del sistema varía en consecuencia, también varían las configuraciones y las dimensiones de los electrodos



necesarios para realizar este objetivo, en este caso con la fuerte influencia del terreno donde se encuentran los electrodos, especialmente la resistividad eléctrica del suelo. (Manuel et al., 2019).

La función de la puesta a tierra es la de forzar la derivación, al terreno, de las intensidades de corriente, de cualquier naturaleza que se puedan originar, ya se trate de corrientes de defecto, bajo frecuencia industrial, o debidas a descargas atmosféricas, de carácter impulsiva, con ello, se logra: (García, 1999).

- Limitar la diferencia de potencial que, en un momento dado, puede presentarse entre estructuras metálicas y tierra. (García, 1999)
- Posibilitar la detección de defectos a tierra y asegurar la actuación y coordinación de las protecciones, eliminando o disminuyendo, así, el riesgo que supone una avería para el material utilizado y las personas. (García, 1999).
- Limitar las sobretensiones internas (de maniobra -transitorias- y temporales) que puedan aparecer en la red eléctrica, en determinadas condiciones de explotación. (García, 1999).
- Evitar que las tensiones de frente escarpado que originan las descargas de los rayos provoquen "cebados inversos", en el caso de instalaciones de exterior y, particularmente, en líneas aéreas (García, 1999).

2.2. COMPONENTES DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

La eficacia general de cualquier sistema de puesta a tierra estará determinada por los componentes individuales que se utilicen para construir el sistema y la manera en que se conecten los componentes. Se debe tener mucho cuidado en la selección de todos los siguientes componentes de puesta a tierra:

- Conductores de tierra.

- Varilla de conexión a tierra
- Los conectores

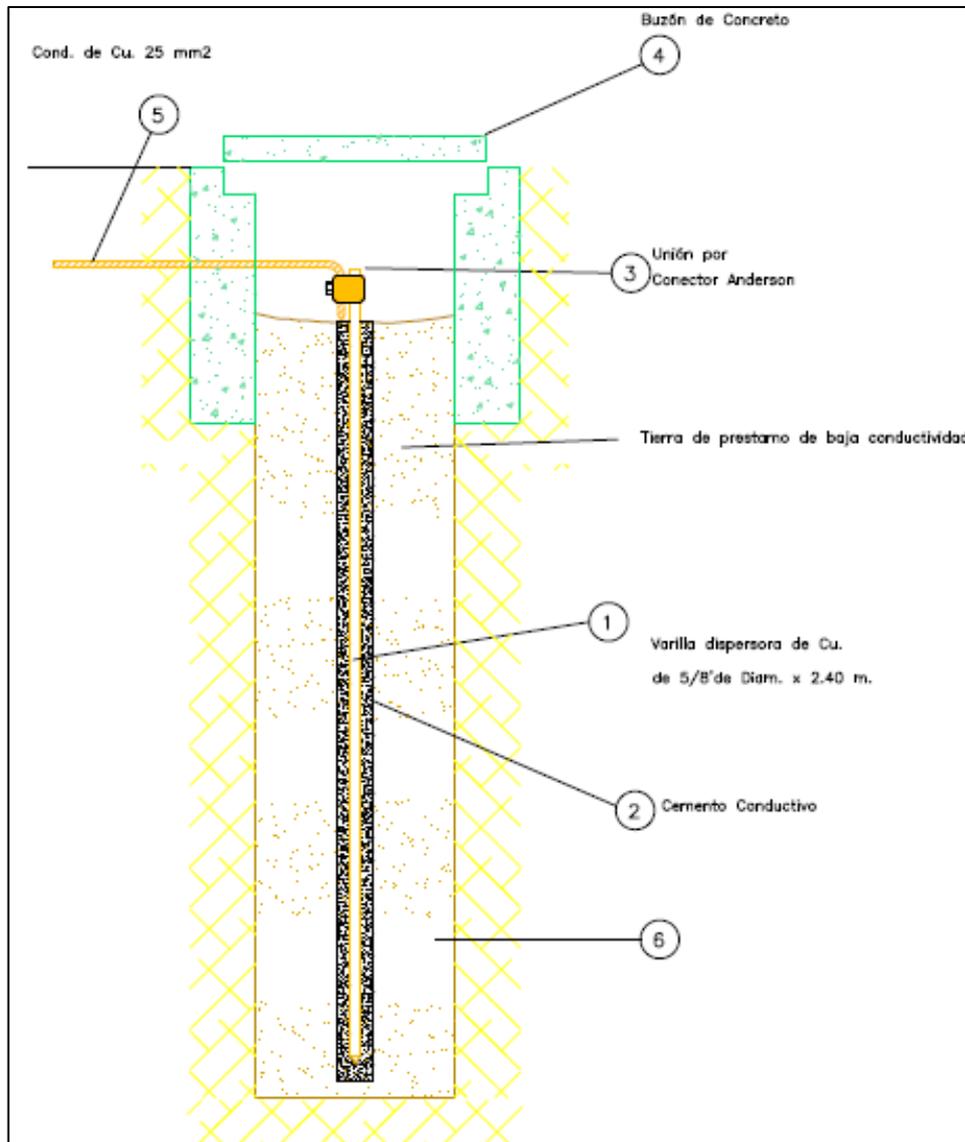


Figura 1: Componentes de la puesta a tierra.

Elaboración propia.

2.2.1. Los conductores de tierra

El CNE contiene los requisitos tanto para el equipamiento, los conductores de tierra y el electrodo de tierra. Recordemos que el equipamiento se utiliza para conectar las partes metálicas no portadoras de corriente del equipo, recintos, canales, etc., al sistema conectado a tierra en el servicio o fuente de un sistema derivado por separado.



El conductor, por otro lado, se utiliza para conectar la toma de tierra del electrodo al equipamiento y/o conductor a tierra en el servicio o fuente de un sistema derivado por separado.

2.2.2. Las varillas de tierra

El sistema de puesta a tierra más elaborado que se pueda diseñar puede resultar ineficaz a menos que la conexión a tierra sea adecuada y tenga una resistencia suficientemente baja. Dado que la resistencia deseada varía inversamente con la corriente de defecto a tierra, cuanto mayor sea la corriente de defecto, menor debe ser la resistencia. (Basham et al., 2005)

Las varillas de tierra están disponibles en muchos tamaños y longitudes. Los tamaños más habituales son 1/2", 5/8", 3/4" y 1". El tamaño 1/2" está disponible en acero con revestimiento inoxidable, galvanizado o con revestimiento de cobre. (Rand, 2000).

Se requiere al menos una varilla de 2,40 m; las varillas de hierro o acero deben tener al menos 15 mm de diámetro; las varillas de acero inoxidable revestido de cobre o de acero inoxidable revestido de cobre deben ser de al menos 12 mm. Las varillas deben clavarse hasta al menos 2.40 m. Si una varilla hincada toca un fondo rocoso, la profundidad puede ser inferior. (Short, 2004).

Teóricamente, una varilla de tierra con un diámetro de 1" hincada en un suelo homogéneo de 1.000 ohmios por metro daría 765 ohmios. Si se introduce dos metros en el suelo daría 437 ohmios. Ir a tres metros, sin embargo, no da un cambio tan grande (309 ohmios). En una reducción óhmica más rápida y una instalación utilizando tres varillas, cada una de un metro cada una de un metro, lo que daría 230 ohmios varilla de tres metros. Esto supone que separadas "más que la suma de sus longitudes entre sí". Si el cable de

interconexión desnudo también está enterrado bajo la superficie, entonces el sistema de tierra puede ser inferior a 200 ohmios. (Rand, 2000).

Mientras que las varillas de acero con cobre tienen un nivel eléctrico ligeramente más bajo que las barras de acero galvanizado o liso, no son elegidos por su menor resistencia eléctrica, sino por su resistencia a la corrosión. El cobre es un metal más noble que el acero y por lo tanto resistirá la corrosión mucho mejor que el acero, o incluso el acero galvanizado en la mayoría de los suelos. (Switzer, 1999).

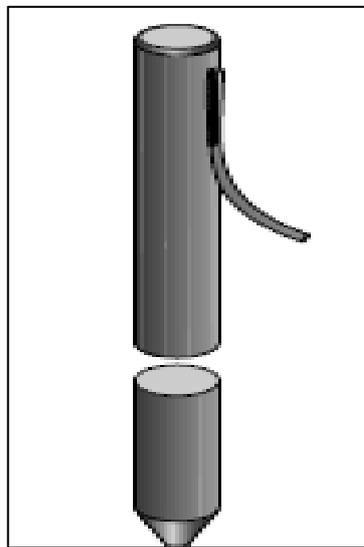


Figura 2: Varilla de tierra.

Fuente: (Switzer, 1999).

El diámetro de la varilla influye poco en la resistencia del electrodo. es necesario principalmente para la resistencia mecánica y para garantizar que la varilla tenga suficiente material para resistir la corrosión. (Short, 2004)

Las varillas inoxidables tienen una vida útil mucho más larga que las varillas de acero revestidas de zinc, especialmente en suelos con alto contenido en cal, pero el acero inoxidable se corroe en determinados suelos, por lo que debe justificarse su mayor coste.



El uso de varillas de cobre puro debe justificarse debido al alto coste y a la susceptibilidad del cobre a sufrir daños durante la instalación. (Basham et al., 2005)

2.2.3. Corrosión de la varilla

La corrosión es uno de los principales problemas de los electrodos de puesta a tierra. Las varillas de tierra suelen ser de acero revestido de cobre o acero galvanizado. La mayoría de los cables de puesta a tierra son de cobre. El acero y el aluminio se corroen demasiado rápido para su uso en tomas de tierra. Un problema del cobre es su atraktividad para los ladrones. En las zonas problemáticas, el acero revestido de cobre ha reducido los robos, ya que tiene menos valor comercial. La mezcla de metales aumenta considerablemente la corrosión. El problema es la corrosión galvánica. (Short, 2004)

Cuando las resistividades del suelo sean bajas y pueda producirse corrosión galvánica entre masas metálicas ferrosas adyacentes. Las varillas inoxidables tienen una vida útil mucho más larga que las varillas de acero revestidas de zinc, especialmente en suelos con alto contenido en cal.(Basham et al., 2005)

2.2.4. Conectores

Para la mayoría de las aplicaciones de los conectores hay una elección. Esta elección depende de la vida útil requerida, la corrosión esperada, el nivel de corriente esperado (rayos y fallas) y el costo total de la instalación. (Switzer, 1999).



Figura 3: Conector de tierra tipo AB.

Fuente: para-rayos.com

Las conexiones a la varilla de tierra pueden ser tan importantes como la varilla misma, a menudo, un conductor se conecta a una o dos varillas de tierra; en algunos casos, esto es un desbalance ya que la varilla no puede llevar tanta corriente como el conductor. (Switzer, 1999).

2.2.5. Resistencia de conexión a tierra

El valor de la resistencia de la puesta a tierra debe ser tal que, cualquier masa no pueda dar lugar a tensiones de contacto superiores a las permitidas y no debe ser mayor a 25Ω . Cuando un electrodo simple, consistente en una varilla, tubería o placa, tenga una resistencia a tierra mayor de 25Ω , es necesario instalar un electrodo adicional a una distancia de por lo menos 2 m, o a una distancia equivalente a la longitud del electrodo; o se debe emplear cualquier otro método alternativo.(MEM, 2012).

Como la Tierra es relativamente infinita en su tamaño, comparada con los sistemas de puesta a tierra, así como su capacidad de absorber un suministro virtualmente



ilimitado de corriente, sin embargo, esta corriente ilimitada a la tierra se transmite a través del metal interfaz electrodo-tierra (Rappaport & Mohla, 2007).

La puesta a tierra con un solo electrodo deberá tener una resistencia a tierra que no exceda 25 ohmios, si la resistencia con un solo electrodo excede 25 ohmios, deberán utilizarse otros métodos de puesta a tierra que permitan cumplir con este requerimiento. (MEM, 2012).

Cuando tenga que disminuirse la resistencia de puesta a tierra se podrá usar otros métodos, como puede ser el empleo de tratamiento químico o suelos artificiales, que deberán ser aceptables y certificados por una entidad especializada e imparcial competente, asegurándose que dicho tratamiento no atiente contra el medio ambiente. (MEM, 2012)

La resistencia de conexión a tierra de un electrodo se compone de lo siguiente:

- Resistencia de la varilla de metal
- Resistencia de contacto entre la varilla y el suelo
- Resistencia del suelo.

Las dos primeras resistencias pueden hacerse relativamente pequeñas con respecto a la del suelo y pueden ser desestimadas a todos los efectos prácticos. (Rappaport & Mohla, 2007).

Alrededor de un electrodo de tierra, la resistencia del suelo es la suma de las resistencias en serie de cáscaras virtuales de tierra, localizadas progresivamente hacia afuera de la capa más cercana a la varilla tiene el área circunferencial o sección transversal más pequeña, por lo que tiene la mayor resistencia, los sucesivos caparazones fuera de éste tienen áreas progresivamente más grandes, y por lo tanto progresivamente

resistencias más bajas, a medida que el radio de la varilla aumenta, la resistencia incrementada por unidad del radio disminuye efectivamente hasta casi cero. (Rappaport & Mohla, 2007).

Los suelos de la tierra consisten en partículas sólidas y sales disueltas, la corriente eléctrica fluye a través de la tierra principalmente como movimiento iónico; la conducción iónica está muy influida por la concentración y los tipos de sales en la humedad del suelo entonces la disociación iónica se produce cuando las sales se disuelven, y es el movimiento de estos iones bajo la influencia del potencial eléctrico lo que permite al medio conducir la electricidad. (EMCS et al., 1987).

Normalmente hay varias capas, cada una con una resistividad diferente, también pueden producirse cambios laterales, pero en general estos cambios son graduales e insignificantes al menos en las proximidades del lugar en estudio. (Mukhedkar & Dawalibi, 1984)

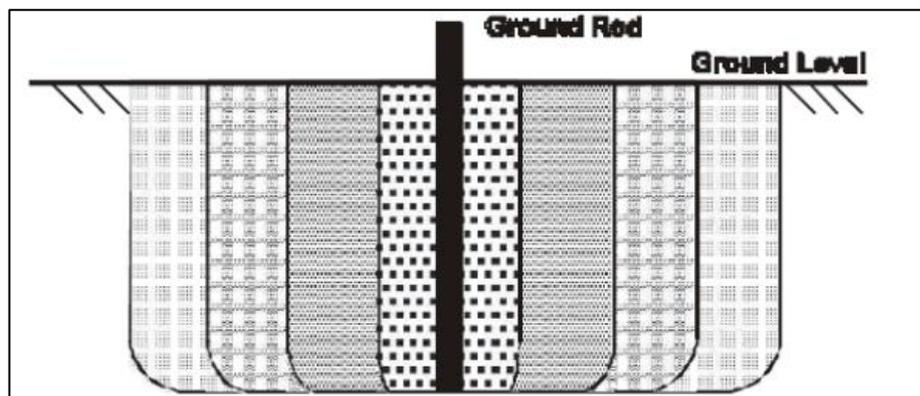


Figura 4: Resistencia de tierra.

Fuente: (Rand, 2000).

2.2.6. Resistividad del suelo

El terreno es mal conductor de la electricidad, si lo comparamos con los elementos conductores normalmente utilizados en las instalaciones eléctricas; sin embargo, es un



elemento conductor, por lo que las corrientes de defecto discurren a través de él, al no encontrar otro camino más favorable. (Clemente, 1991).

Normalmente, en el lugar donde se va a instalar un sistema de puesta a tierra, se realizará un extenso trabajo geotécnico; esta labor suele implicar una prospección geológica, que puede proporcionar una cantidad considerable de información sobre la naturaleza y la configuración del suelo. (DeCosta et al., 2012).

La resistividad de la tierra varía en función de su composición, más humedad en el suelo o una mayor temperatura del suelo disminuye su resistividad.(Basham et al., 2005).

La resistividad del suelo es la resistencia de un determinado volumen de suelo. Normalmente, la resistividad se especifica en Ω -m, la resistencia entre caras opuestas del cubo de suelo con un volumen de 1 m^3 . También son comunes las unidades de Ω -cm. (Short, 2004).

Las resistividades del suelo varían mucho. Un suelo orgánico rico y húmedo puede tener una resistividad de 10Ω -m, mientras que el lecho rocoso puede tener resistividades superiores a 104Ω -m. La resistividad depende de las características del grano del suelo (tamaño, variabilidad y densidad) así como de la humedad y el contenido químico.

La resistividad total de un terreno es la resultante de las correspondientes a las diversas capas que lo constituyan. Puede suceder que una sola capa presente una resistividad tan baja que la influencia de las demás sea imperceptible, tal como cuando se alcanzan zonas de agua o el nivel freático. (García, 1999).

Se recomienda firmemente que la resistividad de la tierra en el lugar deseado de la conexión sea estudiada. La resistividad de los suelos varía con la profundidad desde la



superficie, el tipo y la concentración de productos químicos solubles en el suelo, el contenido de humedad, y la temperatura del suelo. En otras palabras, la resistividad es la del electrolito en el suelo. La presencia de agua superficial no indica necesariamente una baja resistividad. (Rappaport & Mohla, 2007).

La resistividad del suelo suele variar significativamente con la profundidad. En la mayoría de las zonas, la resistividad mejora significativamente con la profundidad a medida que aumenta la humedad, y normalmente, los terrenos excavados hasta el nivel freático proporcionan un suelo muy bueno. En otras zonas, el lecho rocoso subyacente aumenta significativamente la resistividad.

2.3. EFECTOS AMBIENTALES

La resistividad del suelo no sólo varía según el tipo de terreno, sino también según la temperatura, la humedad, el contenido en sal y la compactación; tenemos que los valores de resistividad de la Tierra varían de 0,01 a 1 Ω .m para el agua de mar y hasta 109 Ω .m para la piedra arenisca. La resistividad de la tierra aumenta lentamente con la disminución de las temperaturas de 25 °C a 0 °C; pero por debajo de 0 °C la resistividad aumenta rápidamente, en el suelo congelado, como en la capa superficial en invierno la resistividad puede ser excepcionalmente alta. (Mukhedkar & Dawalibi, 1984)

Humedad - La humedad es uno de los principales factores que determinan la resistividad del suelo. Cuanto más seco esté el suelo, mayor será la resistividad. Los cambios en el nivel de humedad a lo largo del año son la principal razón del cambio en la resistencia del electrodo de tierra. Una vez que la humedad supera el 22%, la resistividad cambia muy poco.

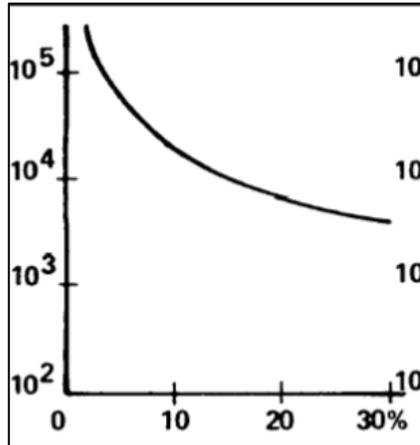


Figura 5: Variación de la resistividad por la humedad.

Fuente: (EMCS et al., 1987).

Temperatura - Por encima del punto de congelación del agua, la temperatura no influye significativamente en la resistividad. Por debajo del punto de congelación, la resistividad aumenta considerablemente.

La discontinuidad en la curva de temperatura, indica que a temperaturas inferiores a la de congelación la resistividad del suelo aumentó notablemente.(EMCS et al., 1987).

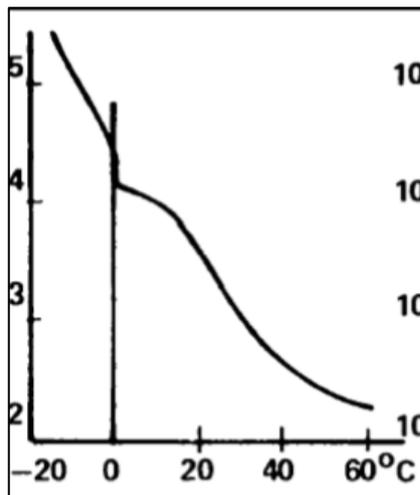


Figura 6: Variación de la resistividad por la temperatura.

Fuente: (EMCS et al., 1987).

Sales - La presencia de sales solubles afecta significativamente a la resistividad del terreno.

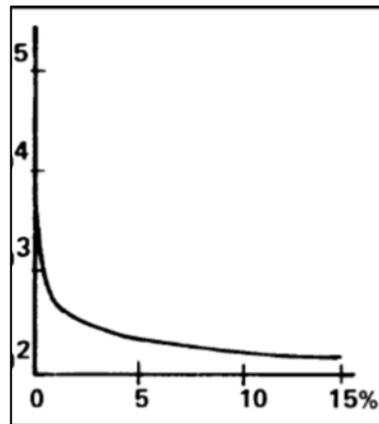


Figura 7: Variación de la resistividad por las sales.

Fuente: (EMCS et al., 1987).

2.4. MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

Es difícil, y en algunos casos imposibles, obtener una aproximación útil de la resistividad del suelo a partir de la resistividad mediciones en las muestras; esto se debe a la dificultad de obtener muestras de suelo representativas y homogéneas. (Mukhedkar & Dawalibi, 1984).

Las técnicas para medir la resistividad del suelo son esencialmente la misma cualquiera que sea el propósito de la medición; sin embargo, la interpretación de los datos registrados puede variar considerablemente, especialmente cuando se trata de suelos con resistividades no uniformes. (Mukhedkar & Dawalibi, 1984).

La resistividad del terreno se mide normalmente mediante el método de los cuatro puntos. Se colocan cuatro electrodos del mismo tamaño a la misma profundidad en línea recta con la misma separación entre ellos. El equipo de medición inyecta corriente a través de los dos electrodos exteriores y mide la tensión entre los dos electrodos interiores. La distancia entre dos electrodos determina la profundidad a la que se mide la resistividad media. Si la distancia entre electrodos es al menos 20 veces la profundidad de los electrodos, la resistividad es: (Short, 2004)

$$\rho = 2\pi AR \quad (1)$$

El espaciado de los electrodos (a) corresponde a la profundidad del suelo vista por la corriente de prueba; variando el espaciado de los electrodos, se puede obtener un perfil de resistividad frente a la profundidad y los resultados pueden ser en Ohm-m u Ohm-cm y se "conectan" a otras fórmulas que determinan el tamaño y la configuración de los electrodos de cobre en el sistema de puesta a tierra. (Rand, 2000).

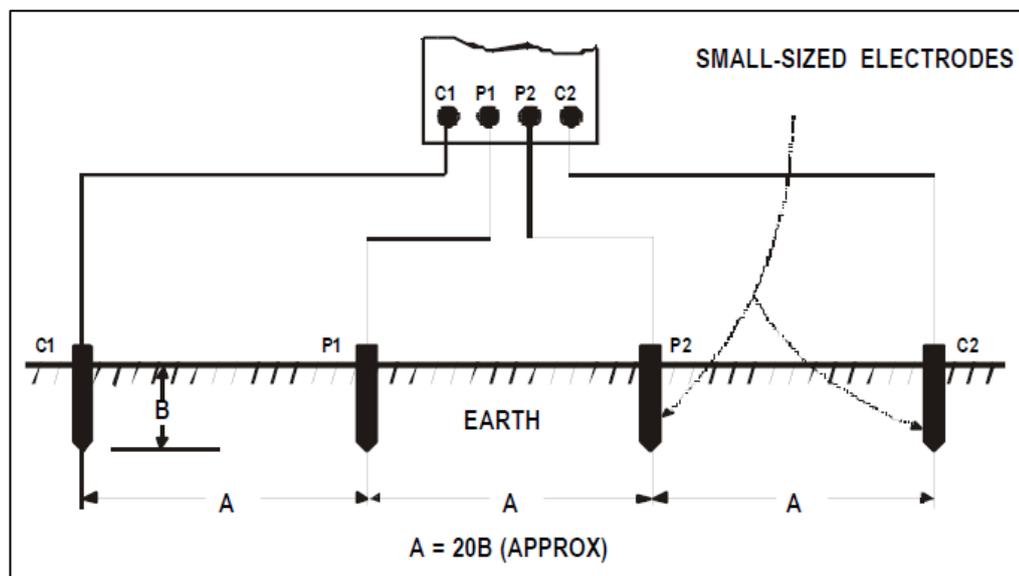


Figura 8: Método de medición de la resistividad.

Fuente: (Rand, 2000).

La resistividad se define en términos de la resistencia eléctrica de un cubo de material homogéneo; la resistencia de un cubo homogéneo, medida a través de caras opuestas, es proporcional a la resistividad e inversamente proporcional a la longitud de una cara del cubo. La resistencia es: (EMCS et al., 1987).

$$R = \rho \frac{l}{s} = \rho \frac{L}{L^2} = \left(\frac{\rho}{L}\right) \text{ ohms} \quad (2)$$

Donde

ρ = resistividad del material, ohms - (unidad de longitud);

L = longitud de un lado del cubo, (unidad de longitud), y

A = área de una cara del cubo, (unidad de longitud)².

La resistencia de un subsistema de toma de tierra puede calcularse en general con fórmulas que se basan en la fórmula general de la resistencia. (Clemente, 1991)

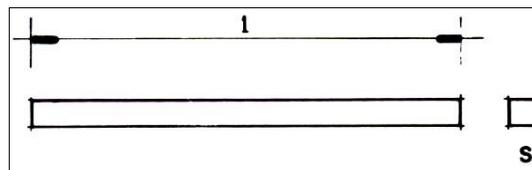


Figura 9: Esquema de la varilla.

Fuente: (Clemente, 1991)

$$R = \rho \frac{l}{s} = \frac{E}{I} \quad (3)$$

Donde:

ρ : resistividad del material conductor,

l : longitud del camino para el flujo de la corriente en la tierra,

A : área de la sección transversal del camino conductor,

I : corriente en el electrodo, y

E : voltaje del electrodo medido con respecto al infinito.

2.4.1. Métodos de medición

Principalmente tenemos los siguientes métodos de medición de la resistividad



2.4.1.1. Método de dos puntos

Se pueden hacer mediciones aproximadas de la resistividad de la tierra no contaminada de los suelos con el método de dos puntos; consiste en un pequeño electrodo de hierro y otro más pequeño, ambos conectados a una varilla aislante; el terminal positivo de una batería está conectado a través de un miliamperio a la varilla más pequeña y el terminal negativo al otro electrodo; el instrumento puede ser calibrado para leer directamente en ohmímetros a la tensión nominal de la batería. (Mukhedkar & Dawalibi, 1984)

Este tipo de aparato es fácilmente portátil y con él una serie de mediciones se puede hacer en poco tiempo en pequeños volúmenes de tierra, hincando los electrodos en el suelo o en las paredes o el fondo de las excavaciones. (Mukhedkar & Dawalibi, 1984).

2.4.1.2. Método de los tres puntos

Este método, es una prueba de resistencia al suelo realizada varias veces, cada vez la profundidad de enterramiento del electrodo probado se incrementa en un valor determinado; el valor de resistencia medido reflejará entonces la variación de la resistividad al aumentar profundidad. (DeCosta et al., 2012).

El método de variación de la profundidad da información útil sobre la naturaleza del suelo en las proximidades de la varilla (5 a 10 veces la longitud de la barra). (Mukhedkar & Dawalibi, 1984).

Una desventaja de este método es que la varilla puede vibrar mientras es golpeada, resultando en un pobre contacto con el suelo a lo largo de su longitud, por lo tanto, haciendo difícil una conversión a la verdadera resistividad aparente. (DeCosta et al., 2012)

2.4.1.3. Método de cuatro puntos

El método más preciso en la práctica para medir la resistividad media de grandes volúmenes de tierra no contaminada es el método de cuatro puntos; los pequeños electrodos se entierran en cuatro pequeños agujeros en la tierra, todos a profundidad b y espaciados (en línea recta) a intervalos a ; se inyecta una corriente de prueba I entre los dos electrodos exteriores y el potencial V entre el dos electrodos internos se mide con un potenciómetro o voltímetro de alta impedancia. Entonces V/I da la resistencia R en ohm. (DeCosta et al., 2012).

A menudo se utilizan dos variaciones diferentes del método de cuatro puntos: (Mukhedkar & Dawalibi, 1984).

2.4.1.4. Disposición de Espacios Iguales o de Wenner.

Con esta disposición los electrodos están espaciados equitativamente; sea la distancia entre dos electrodos adyacentes, entonces, la resistividad ρ en términos de las unidades de longitud en las que se miden a y b es: (DeCosta et al., 2012)

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

Sin embargo, en la práctica, cuatro barras se colocan normalmente en línea recta a intervalos a , conducidas a una profundidad no superior a $0,1 a$; entonces asumimos que $b = 0$ y la fórmula se convierte: (DeCosta et al., 2012)

$$\rho = 2\pi a R \quad (5)$$

Nos da aproximadamente la resistividad media del suelo a la profundidad a .

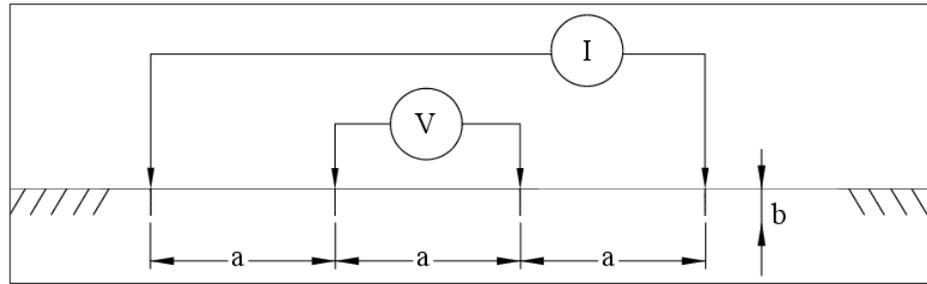


Figura 10: Sistema simétrico.

Fuente: (DeCosta et al., 2012)

Un conjunto de lecturas tomadas con varios espaciamentos de sondas da un conjunto de resistividades que, cuando se trazan contra el espaciamento, indican si hay capas distintas de diferentes suelos y da una idea de sus respectivas resistividades y profundidad. (Mukhedkar & Dawalibi, 1984)

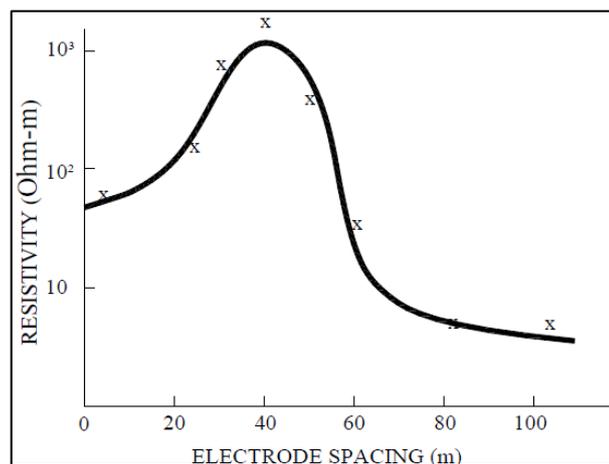


Figura 11: Curva de resistencia típica.

Fuente: (DeCosta et al., 2012)

2.4.1.5. Arreglo de Schlumberger-Palmer o de espaciamento desigual.

Si la profundidad de enterramiento de los electrodos b es pequeña comparada con su separación d y c , entonces la resistividad medida puede ser calculada como sigue: (Mukhedkar & Dawalibi, 1984).

$$\rho = \frac{\pi c(c + d)R}{d} \quad (6)$$

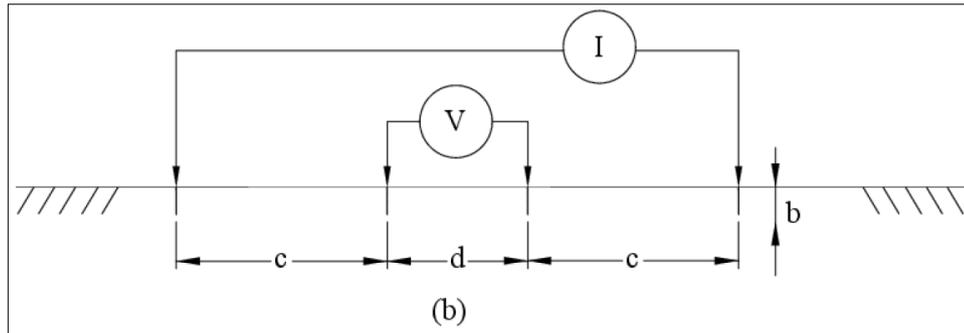


Figura 12: Método de Schlumberger.

Fuente: (DeCosta et al., 2012).

2.5. MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE TIERRA

Se realizan normalmente utilizando un método de tres puntos (Short, 2004). Las técnicas actuales utilizan equipo con CC de estado estable o formas de onda de la fuente de corriente alterna de baja frecuencia (Rand, 2000).

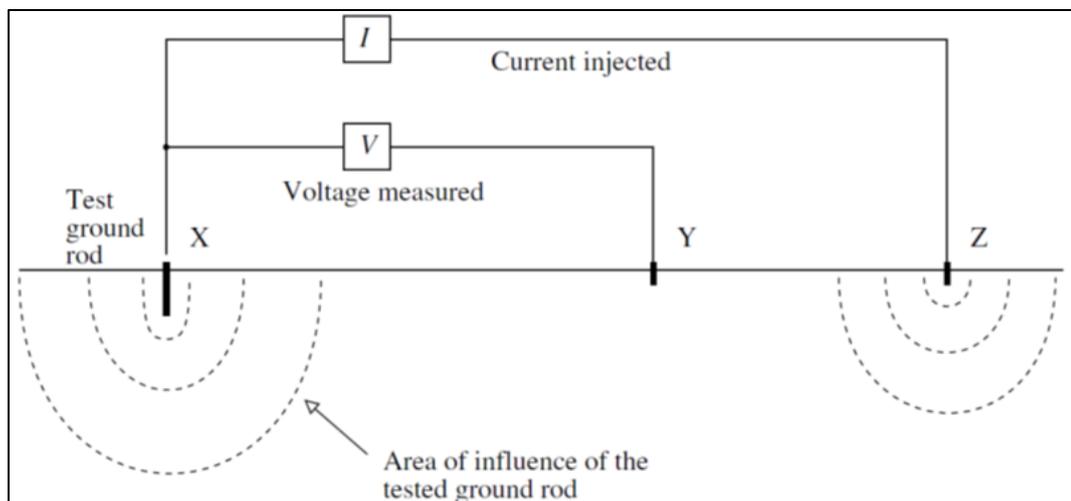


Figura 13: Medición de la resistencia.

Fuente: (Short, 2004).

2.5.1. Método de la pendiente

El método de las tres puntas, también conocido como el Método de la Caída de Potencial, se utiliza para medir la resistencia de una sola varilla de tierra. (Rand, 2000).

El método de caída de potencial es la técnica de tres puntos más común. Requiere varias mediciones con el electrodo central en diferentes puntos entre el electrodo de prueba y el electrodo exterior se traza la resistencia en función de la distancia y elige la resistencia de la parte de la curva en la que la resistencia se aplanan. El punto en el que la curva de caída de potencial se aplanan es probablemente cerca del 62% de la distancia desde el electrodo de prueba y el electrodo exterior. (Short, 2004)

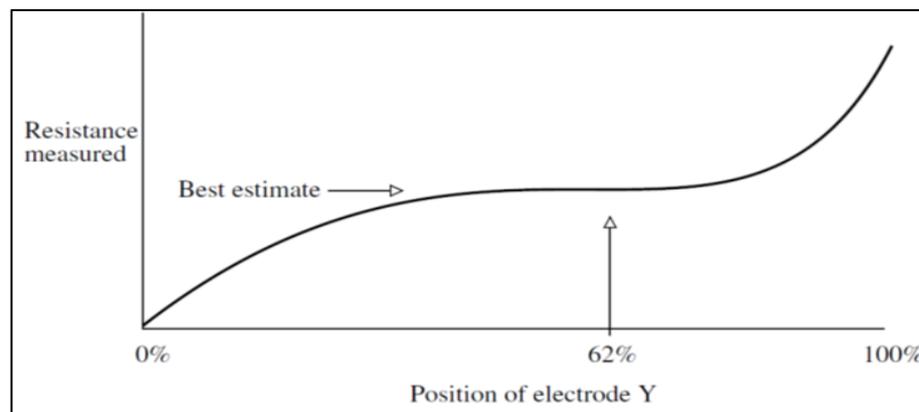


Figura 14: Grafica de caída de potencial.

Fuente: (Short, 2004).

Se puede describir de la manera siguiente:

El método de caída de potencial (FOP) consiste en hacer pasar una corriente entre un electrodo de tierra (G) y una toma de corriente (CP) y, a continuación, medir la tensión entre G y una toma de potencial (PP), como se muestra en la figura.

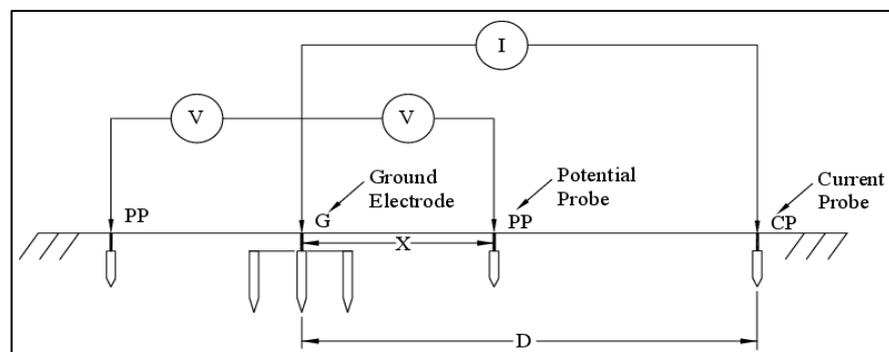


Figura 15: Representación del método de caída de potencial.

Fuente: (DeCosta et al., 2012).



Para minimizar las influencias entre electrodos debidas a las resistencias mutuas, la sonda de corriente se coloca generalmente a una distancia considerable del electrodo de tierra sometido a prueba. (DeCosta et al., 2012).

Normalmente, esta distancia es al menos cinco veces la mayor dimensión del electrodo de tierra sometido a prueba. La sonda de potencial se coloca normalmente en la misma dirección que la sonda de corriente, pero puede colocarse en la dirección opuesta, como se muestra en la figura. En la práctica, la distancia "X" de la sonda de potencial suele ser el 62% de la distancia de la sonda de corriente cuando las sondas de corriente y potencial están en la misma dirección (regla del 62%). Esta distancia se basa en la posición teóricamente correcta para medir con exactitud la impedancia del electrodo para un suelo con resistividad uniforme. (DeCosta et al., 2012).

2.6. TRATAMIENTO DEL SUELO

El tratamiento químico de los suelos es una solución activa al problema de los suelos de alta resistividad. (Rappaport & Mohla, 2007).

Si la resistividad del suelo es muy alta, se utiliza un material de relleno alrededor de la varilla del suelo para bajar la resistencia del sistema, se debe tener cuidado al elegir el material utilizado el cual debe ser de un material compatible con la varilla de tierra, el conductor y el material de conexión. (Switzer, 1999).

La resistividad del suelo puede reducirse entre el 15% y el 90% mediante tratamiento químico, hay un número de productos químicos adecuados para este propósito, incluyendo el cloruro de sodio, sulfato de magnesio, sulfato de cobre y cloruro de calcio; la sal común y el sulfato de magnesio son los más utilizados. (Rappaport & Mohla, 2007)

2.6.1. Tratamientos Electroquímicos

Los aditivos químicos, como la sal común, el sulfato de cobre y/o el sulfato de magnesio, ayudarán a reducir el valor de resistencia para que pueda producirse alguna disipación; el sulfato de magnesio tendrá un impacto ambiental mucho menor que las otras sales, todas las sales disminuirán el punto de congelación de la humedad del suelo, lo cual es importante a mayores alturas. (Rand, 2000).

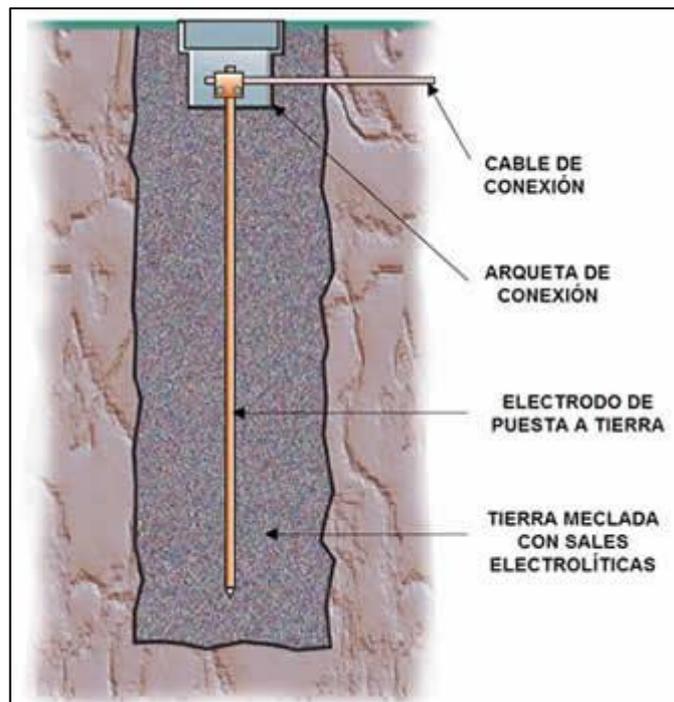


Figura 16: Puesta a tierra tratada con sales

Fuente: <https://ikastaroak.ulhi.net>

La encapsulación de elementos radiales en geles conductores o en materiales de carbono es una alternativa donde hay poco o ningún suelo; el gel de acrilamida, el gel de silicato y el gel de ferrocianuro de cobre se menciona en el orden de mayor conductividad; sin embargo, todos implican materiales tóxicos y/o peligrosos. (Rand, 2000).

Los productos químicos se aplican generalmente colocándolos en una zanja circular alrededor del electrodo de tal manera que se evite el contacto directo con el electrodo, los efectos positivos del tratamiento del suelo no se harán fácilmente evidentes,

pueden ser acelerados por la saturación la zona con agua proporcionando agua a las ubicaciones de los electrodos, este tratamiento no es permanente y debe ser repuesto periódicamente, según la naturaleza del tratamiento químico y las características del suelo. (Rappaport & Mohla, 2007)

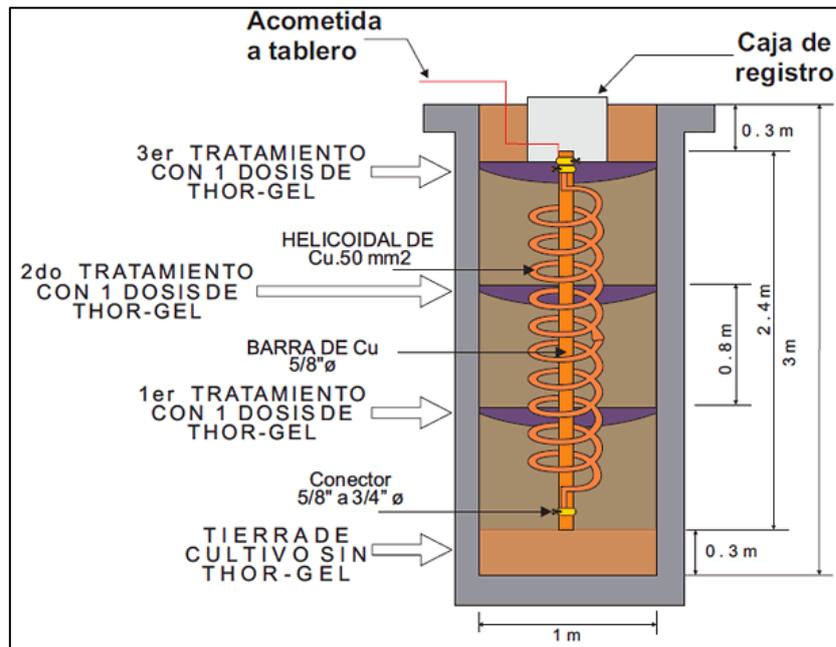


Figura 17: Puesta a tierra tratada químicamente.

Fuente: <https://saamiseg.com>

Otros materiales disponibles para reducir la resistencia del electrodo de varilla a tierra se colocan alrededor de la varilla que se ha instalado en un agujero perforado; aunque tienen una resistividad más alta que la varilla metálica, su resistividad es más baja que la del suelo circundante; algunos de los materiales que se utilizan comúnmente como materiales de mejora del suelo junto con sus resistividades son los siguientes: (Switzer, 1999).

- Bentonita (arcilla) : 250 ohm-cm. (2,5 ohm-m) (Se encoge y pierde el contacto con la varilla y la tierra cuando se seca).

- Cemento conductivo : 12 ohm-cm (0.12 ohm-m) o menos.
(Permanente, se establece como el hormigón y no se encoge o se filtra en el suelo).

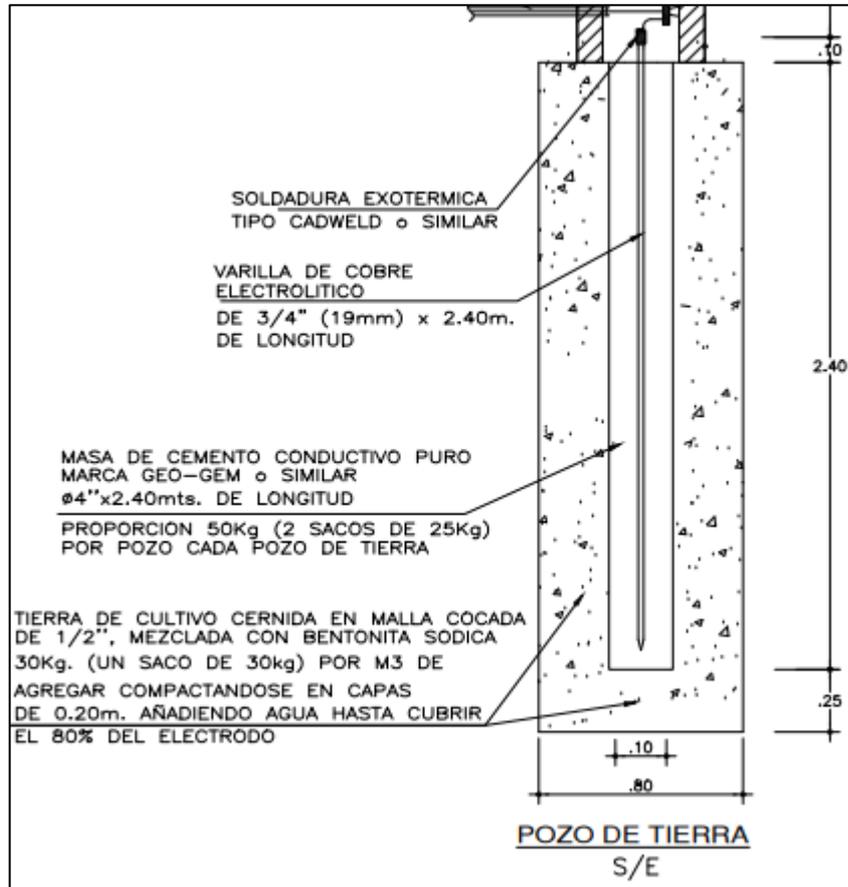


Figura 18: Método de tratamiento.

Fuente: <https://www.elecperu.com>



CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES

Como material de la investigación tenemos la instalación del sistema a tierra del Hospital Manuel Núñez Butron de la ciudad de Puno.

3.1.1. Tipo de investigación

El presente trabajo de investigación será de tipo no experimental, en su variante descriptivo correlacional. (Sampieri et al., 2010).

a. Diseño de investigación:

El método de investigación en cada objetivo específico es del tipo no experimental, transversal, descriptivo; la toma de datos es del tipo longitudinal, Correlacional, causal, propuesto por Hernández Sampieri (Sampieri et al., 2010).

Las modalidades que se ajustan al presente proyecto son los siguientes:

b. Investigación de campo

Se utiliza este tipo de investigación debido a la naturaleza del proyecto, en el cual es necesario estar en el lugar mismo y a través de ello se verificará e indagará las posibles causas que se está tratando solucionar, sin manipulación de las variables, permitiendo generalizar los resultados obtenidos a situaciones afines.

c. Investigación bibliográfica-documental

En esta investigación se tiene como finalidad ampliar y profundizar las teorías y enfoques acerca de los sistemas de puesta a tierra, mediante la utilización de libros, catálogos, textos, páginas electrónicas, entre otros.

d. Investigación no experimental

Esta investigación será de tipo No experimental, ya que no se manipularán variables, y se observará el fenómeno en su contexto natural (Sampieri et al., 2010).

e. Herramientas:

Para el desarrollo se utilizó:

- Datos de resistividad recopilados en campo.
- Registro de mediciones de sistema de puesta a tierra.
- Registro de mediciones de sistema de puesta a tierra tratada con cemento conductivo.
- Medidor digital de la resistencia a tierra (Telurómetro), MEGABRAS Modelo MTD-20KWe.



Figura 19: Telurómetro MEGABRAS Modelo MTD-20KWe.
Fuente: MEGABRAS MTD-20KWe.

3.2. MÉTODO

El método por objetivo es el siguiente:

3.2.1. Estimación de la Resistividad del terreno

De acuerdo a lo recomendado por la norma IEEE Std 81-1983, para estimar la resistividad del terreno utilizamos el método de los cuatro puntos y la disposición de espacios equidistantes también conocidos como el método de Wenner. (DeCosta et al., 2012)

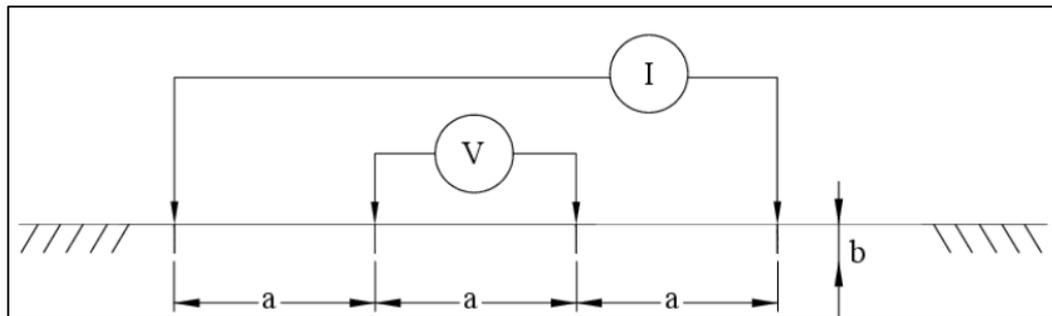


Figura 20: Método de los cuatro puntos.

Fuente: (DeCosta et al., 2012).

El material necesario para determinar las resistividades del suelo es el siguiente:

- Un instrumento de medida de resistencia de tierra, que posea 4 bornes.
- Cuatro piquetas metálicas que sirvan de electrodo.
- Cuatro cables aislados para conectar las piquetas a las tomas del instrumento (García, 1999).

Se instalará el circuito como se ilustra en la figura:

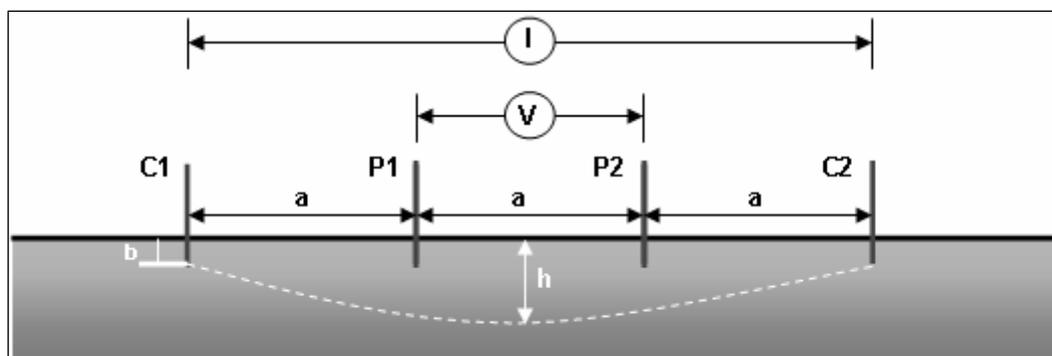


Figura 21: Esquema de instalación.

Fuente: (DeCosta et al., 2012).

Entonces, la resistividad ρ en términos de las unidades de longitud en las que se miden a y b es:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4 * b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (7)$$

El procedimiento es el siguiente:

1. Clave en el terreno cuatro jabalinas (picas), bien alineadas y con separación constante D , como se indica en la figura 17. En esta medición la distancia entre jabalinas es crítica, ya que interviene en el cálculo de resistividad.

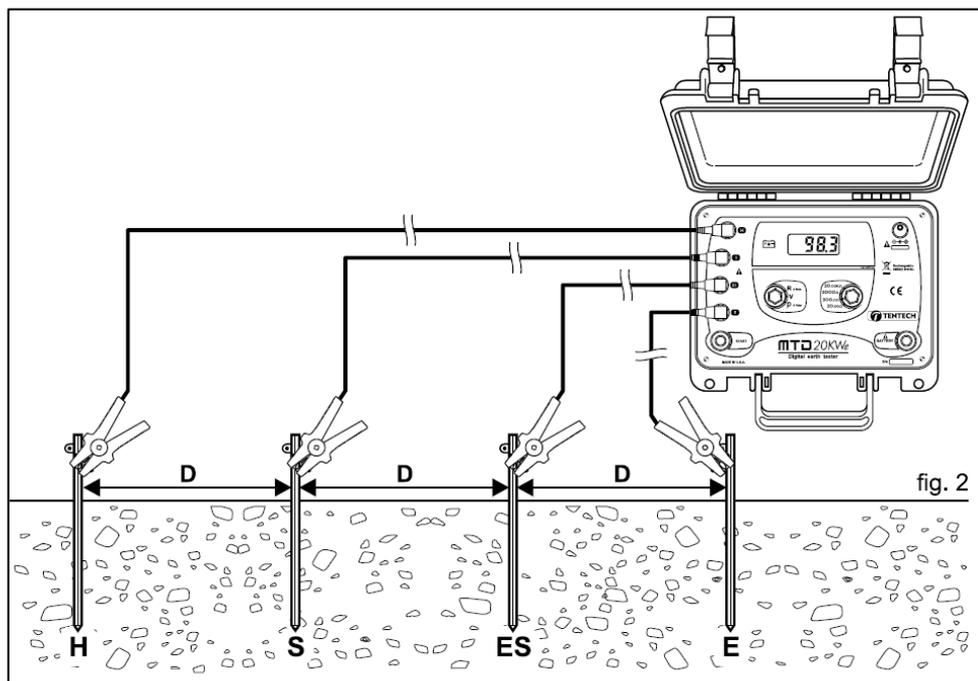


Figura 22: Esquema de instalación del manual.

Fuente: Manual MEGABRAS MTD-20KWe.



Figura 23: Esquema de instalación en campo.
Elaboración propia.

2. Seleccione la posición ρ (4 polos) y conecte las jabalinas como se indica en la figura 17.



Figura 24: Instalación del equipo.
Fuente: Manual MEGABRAS MTD-20KWe.



3. Oprima la tecla START y encuentre la escala más adecuada.

Para obtener el valor de la resistividad media del terreno se debe aplicar la ecuación de Wenner que, en su forma simplificada, es:

$$\rho = 2\pi DR \quad (8)$$

Donde:

ρ = valor de la resistividad media del terreno ($\Omega \cdot m$).

$\pi = 3,14159$

R = valor indicado en el display (Ω).

D = distancia de entre las jabalinas, expresada en metros (m).

Se obtiene así la resistividad media del terreno desde la superficie hasta una profundidad igual a la distancia D entre jabalinas. Haciendo diversas mediciones con diferentes distancias entre jabalinas se obtiene la información requerida para determinar la estratificación del terreno por métodos gráficos o mediante la utilización de un método adecuado. Las distancias generalmente adoptadas son 1, 2, 4, 8 y 16 m. Para realizar la medición con D = 16 m, los cables se pueden distribuir como indica la figura 25.

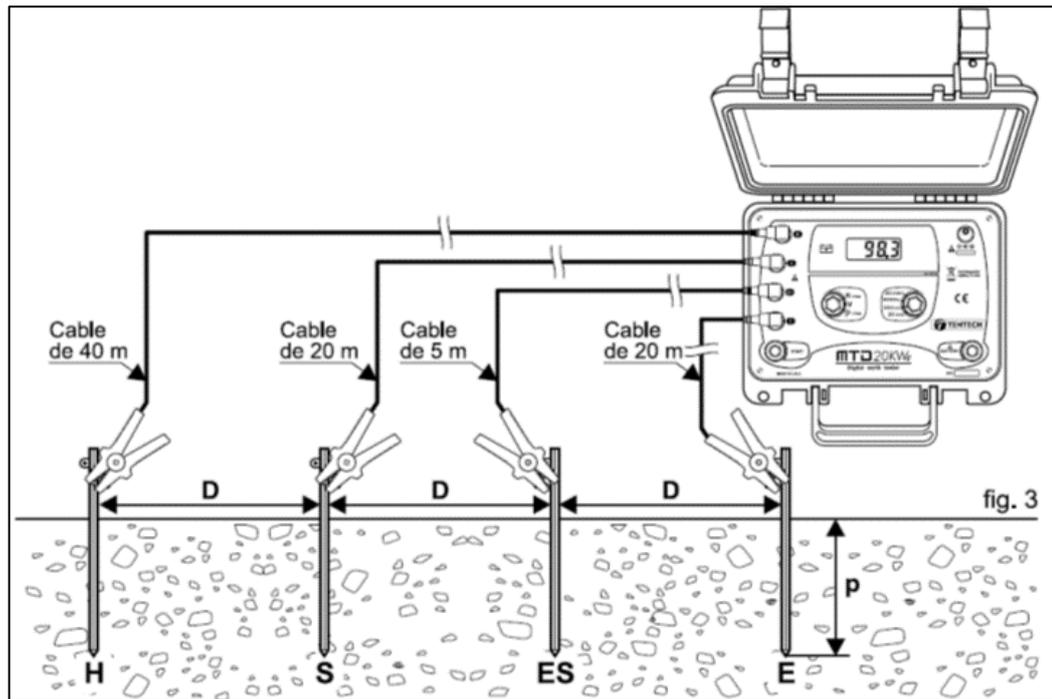


Figura 25: Medida de la resistividad posición ρ (4 pole).

Fuente: Manual MEGABRAS MTD-20KWe.

La forma simplificada de la ecuación de Wenner puede aplicarse siempre que la profundidad de penetración de cada jabalina sea despreciable comparada con la distancia D . Esta condición puede ser difícil de cumplir cuando D es pequeño, por la necesidad de asegurar un buen contacto de la jabalina con el terreno. En ese caso debe aplicarse la forma completa de la ecuación:

$$\rho = \frac{4\pi RD}{1 + \frac{2D}{\sqrt{D^2 + 4 * p^2}} - \frac{D}{\sqrt{D^2 + p^2}}} \quad (9)$$

Donde:

ρ = Resistividad específica del terreno

D = Distancia entre jabalinas (separación)

p = Profundidad de penetración de las jabalinas auxiliares

R = Valor indicado en el display

En el método de Sunde, se utiliza para aproximar un modelo de suelo de dos capas. El gráfico de la Figura 20, que se basa en los datos de la prueba de cuatro clavijas de Wenner.

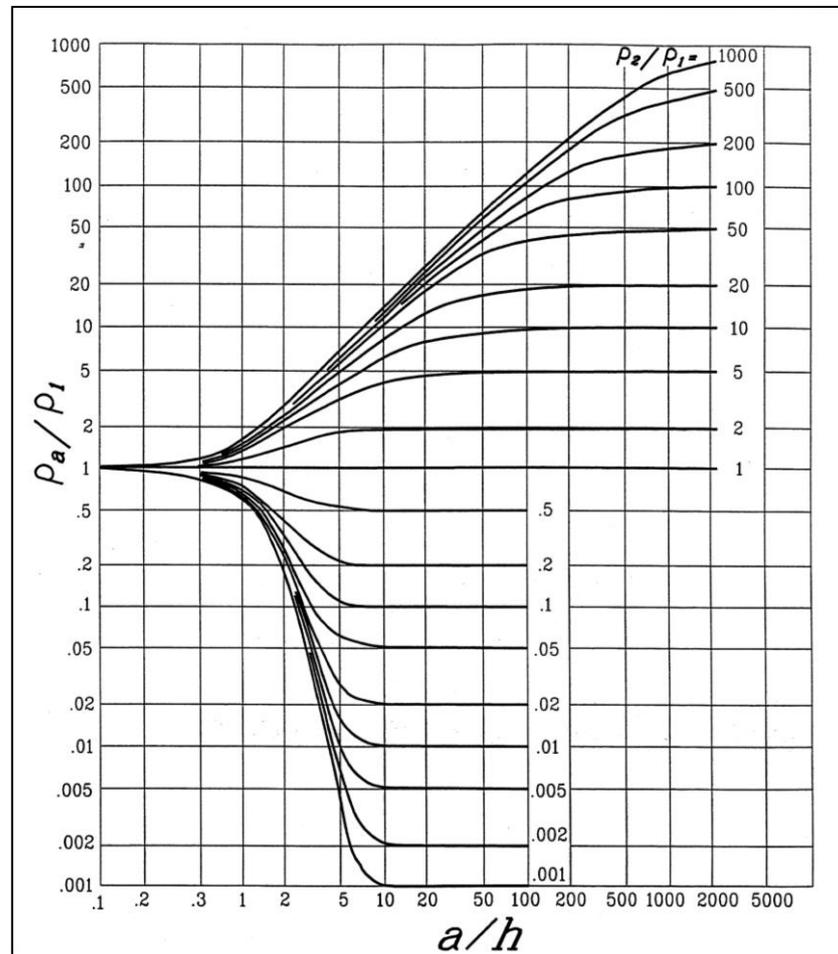


Figura 27: Método gráfico de Sunde.

Fuente: norma IEEE Std 80, 2000.

Los parámetros ρ_1 y ρ_2 se obtienen por inspección de las mediciones de resistividad.

Sólo h se obtiene por el método gráfico de Sunde, como se indica a continuación:

- a) Trace un gráfico de la resistividad aparente ρ_a en el eje y en función a la distancia entre clavijas en el eje x.



- b) Estime ρ_1 y ρ_2 a partir del gráfico representado en a). ρ_a y correspondiente a una separación menor es ρ_1 y para una separación mayor es ρ_2 . Prolongar la gráfica de resistividad aparente en ambos extremos para obtener estos valores extremos de resistividad si los datos del campo son insuficientes.
- c) Determine ρ_2/ρ_1 y seleccione una curva en el gráfico de Sunde de la figura 20, que se aproxime, o bien interpolar y dibujar una nueva curva en el gráfico.
- d) Seleccione el valor en el eje y de ρ_a/ρ_1 dentro de la región inclinada de la curva ρ_2/ρ_1 apropiada de la figura 20.
- e) Lee el valor correspondiente de a/h en el eje x.
- f) Calcule ρ_a multiplicando el valor seleccionado, ρ_a/ρ_1 , en (d) por ρ_1 .
- g) Lea el espaciado de sonda correspondiente en el gráfico de resistividad aparente trazado en a).
- h) Calcule h, la profundidad del nivel superior, utilizando la separación de sonda apropiada, a.

3.2.1.2. Estimación de la resistencia del sistema de puesta a tierra

Nos basamos en el método descrito en la norma IEEE Std 81-2012, para determinar la resistencia de puesta a tierra.

La resistencia a tierra de la varilla enterrada en un suelo uniforme viene dada por la relación matemática (Arturo Galvan D., Gilberto Pretelln G, 2010).

$$R = \frac{\rho_2}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r_1} - 1 \right) \quad (10)$$

En donde:



R: Resistencia de tierra en Ω

ρ : Resistividad del suelo en $\Omega \cdot m$

r : Radio del electrodo

l : Longitud de la varilla m

Tabla 2: Calculo de la Resistencia (R).

Resistencia del sistema de puesta a tierra			
Longitud del electrodo (L)	Radio del electrodo (r)	Resistividad promedio del terreno (ρ)	Cálculo de la resistencia (R)

Elaboración propia.

3.2.2. Estimación de la resistencia del sistema de puesta a tierra mediante tratamiento electroquímico.

De acuerdo a la IEEE Std 80-2000, para la estimación de la resistencia del sistema de puesta a tierra instalados en concreto o en compuestos que mejoran el suelo, establece lo siguiente:

La resistencia del electrodo encajonada en concreto es:

Entonces la ecuación (10) puede resolverse así:

$$R_{CE-rod} = \frac{1}{2\pi L_r} \left\{ \rho \left[\ln \left(\frac{8L_r}{D_c} \right) - 1 \right] + \rho_c \left[\ln \left(\frac{8L_r}{d} \right) - 1 \right] - \rho_c \left[\ln \left(\frac{8L_r}{D_c} \right) - 1 \right] \right\} \quad (11)$$

Donde:



R_{CE-rod} : Resistencia producto del compuesto mejorador del suelo.

ρ_c : es la resistividad del concreto en $\Omega \cdot m$.

ρ : es la resistividad del suelo en $\Omega \cdot m$.

D_c : es el diámetro de la cáscara de concreto en m.

d : es el diámetro de la varilla de tierra en m.

L_r : es la longitud de la varilla de tierra en m.

(Keil & Merryman, 2000).

La ecuación (11) representa la combinación de dos resistencias, una resistencia de un electrodo de radio r_1 , directamente enterrado en un suelo de resistividad ρ y una resistencia de un segmento interno de radio r_2 que contiene un núcleo metálico de radio r_1 . (Galvan ,Pretelín, 2010)

Tabla 3: Resistencia con revestimiento de cemento conductivo.

Resistencia de Puesta a Tierra con Revestimiento de Cemento Conductivo					
Longitud del electrodo (Lr) metros	Resistividad del concreto (ρ_c) $\Omega \cdot m$	Diámetro de la varilla de tierra (d) m	Resistividad del terreno (ρ)	Diámetro del encapsulado de concreto (D) m.	Cálculo de la resistencia (R_{CE-rod})
					$R_{CE-rod} = \frac{1}{2\pi L_r} \{ \rho [\ln(8L_r/d_c) - 1] + \rho_c [\ln(8L_r/d) - 1] - \rho_c [\ln(8L_r/d_c) - 1] \}$

Elaboración propia.



CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se analizan los datos obtenidos producto de las mediciones realizadas, de forma de extraer significados relevantes con relación al problema de investigación y dar respuestas a los objetivos planteados.

4.1. ESTIMACIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

El método utilizado para el cumplimiento del presente objetivo para estimar la resistividad del terreno, es el método de los cuatro puntos y la disposición de espacios equidistantes también conocidos como el método de Wenner está basado a lo recomendado por la norma IEEE Std 81TM-2012, planteada en el capítulo anterior. Se procedió de la siguiente manera:

1. En el terreno se instaló cuatro jabalinas, alineadas y con separación constante D , como se indica en el esquema de instalación y de acuerdo al manual del instrumento.

Se Instaló los 4 electrodos a 30 cm de profundidad y una separación inicial de 1 m, aumentando esta distancia gradualmente en 2, 4, 8 y 16 m, entre cada electrodo.

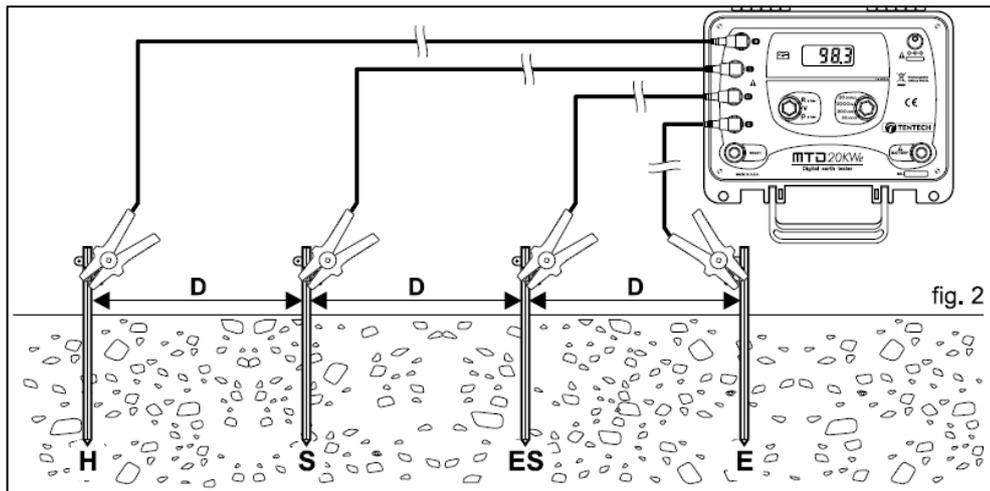


Figura 28: Esquema de instalación.
Fuente: Manual Megabras MTD-20KWe.

2. Se conectan los cables a los terminales y electrodos como se aprecia en la figura N°29.



Figura 29: Esquema de instalación de los cables.
Fuente: Megabras MTD-20KWe.

Los cables se conectan al equipo siguiendo las siguientes instrucciones:

- Cable del electrodo 1 al terminal H.
- Cable del electrodo 2 al terminal S.



- Cable del electrodo 3 al terminal ES.
- Cable del electrodo 4 al terminal E.

Se toma la medida y realizamos el cálculo de acuerdo al método establecido.

Trayectoria N°01

Para la trayectoria N°1, la resistividad, en términos de las unidades de longitud en las que se miden a y b, para la primera medición es:

$$\rho = \frac{4 \times \pi \times 1 \times 16.94}{1 + \frac{2 \times 1}{\sqrt{1^2 + 4 * 0.3^2}} - \frac{1}{\sqrt{1^2 + 0.3^2}}} = 121.15 \Omega \cdot m$$

Los demás cálculos se registran en la siguiente tabla:

Tabla 4: Resistividad aparente del terreno trayectoria 1.

Trayectoria	Lectura del instrumento R(ohm)	Distancia D (m)	Profundidad b (m)	$\rho = 2\pi DR$	$\rho = \frac{4\pi RD}{1 + \frac{2D}{\sqrt{D^2 + 4 * p^2}} - \frac{D}{\sqrt{D^2 + p^2}}}$
1	16.94	1	0.3	106.44	121.15
	3.6	2	0.3	45.24	46.96
	0.86	4	0.3	21.61	21.83
	0.49	6	0.3	18.47	18.55
	0.15	8	0.3	7.54	7.56
	0.05	16	0.3	5.03	5.03

Elaboración Propia.

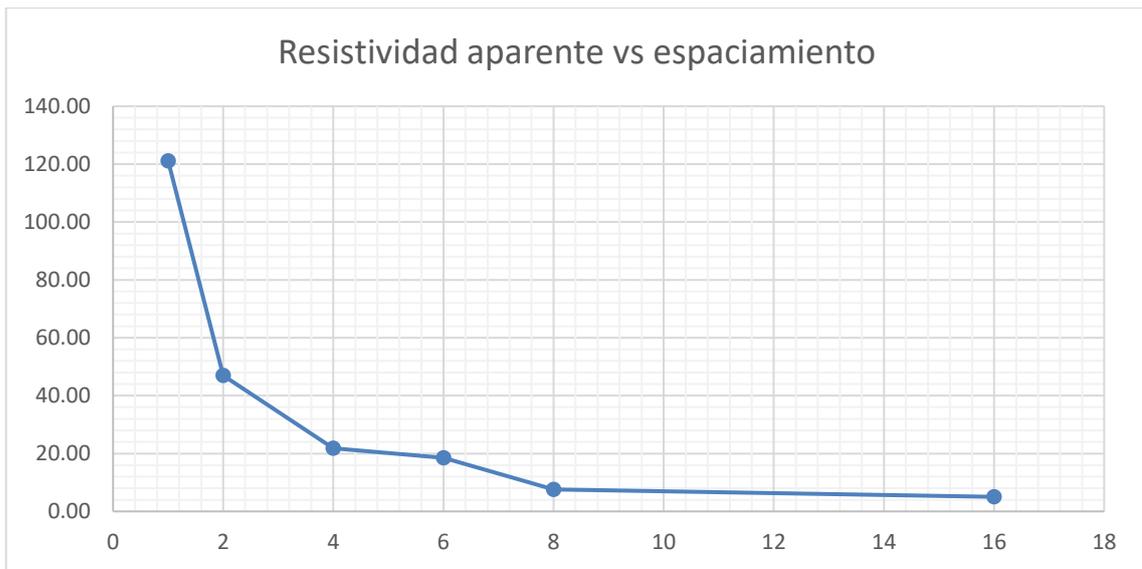


Figura 30: Resistividad aparente vs espaciamiento trayectoria 1.

Elaboración Propia.

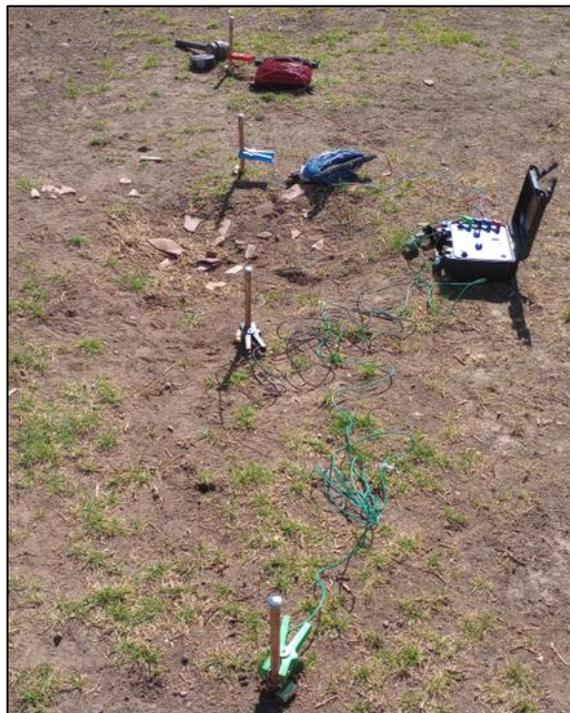


Figura 31: Esquema de instalación de jabalinas trayectoria N°1.

Elaboración propia.

Tabla 5: Resistividad aparente vs espaciamento trayectoria 2.

Trayectoria	Lectura del instrumento R (Ω)	Distancia D (m)	Profundidad b (m)	$\rho = 2\pi DR$	$\rho = \frac{4\pi RD}{1 + \frac{2D}{\sqrt{D^2 + 4 * p^2}} - \frac{D}{\sqrt{D^2 + p^2}}}$
2	25.00	1	0.3	157.08	178.79
	5.86	2	0.3	73.64	76.44
	0.94	4	0.3	23.62	23.86
	0.57	6	0.3	21.49	21.58
	0.26	8	0.3	13.07	13.10
	0.06	16	0.3	6.03	6.04

Elaboración Propia.

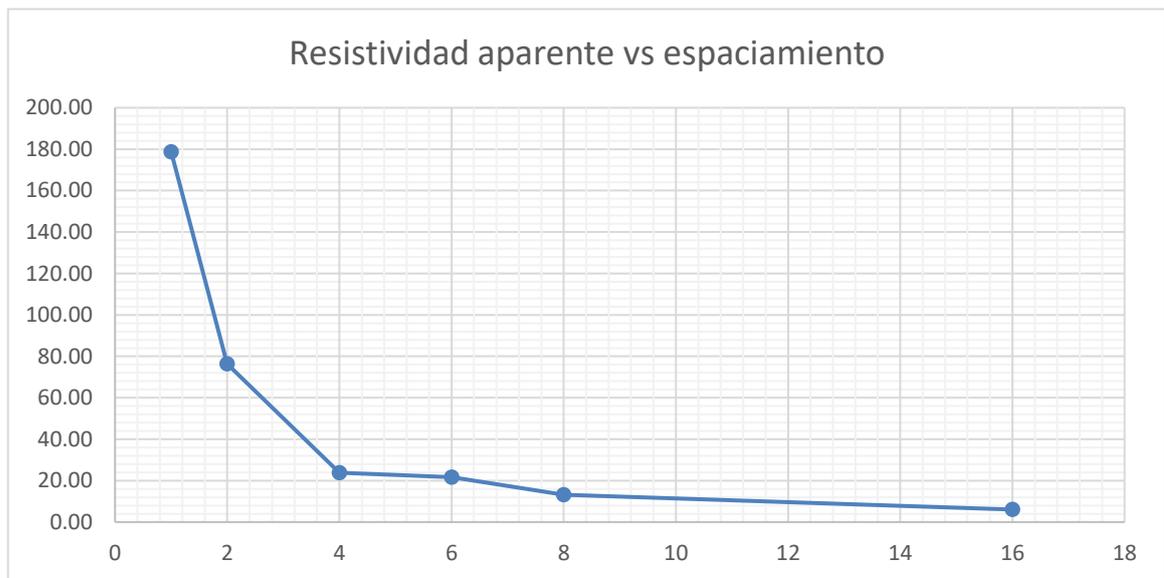


Figura 33: Resistividad aparente vs Espaciamento trayectoria 2.

Elaboración Propia.



Figura 34: Instalación de jabalinas trayectoria N°2.
Elaboración propia.



Figura 35: Lectura del instrumento trayectoria N°2.
Elaboración propia.

Trayectoria N°03

Para la trayectoria N°3, la resistividad, en términos de las unidades de longitud en las que se miden a y b, para la primera medición es:

$$\rho = \frac{4 \times \pi \times 1 \times 38.1}{1 + \frac{2 \times 1}{\sqrt{1^2 + 4 * 0.3^2}} - \frac{1}{\sqrt{1^2 + 0.3^2}}} = 272.47 \Omega.m$$

Los demás cálculos se registran en la siguiente tabla:

Tabla 6: Resistividad aparente vs espaciamento trayectoria 3.

Trayectoria	Lectura del instrumento R (Ω)	Distancia D (m)	Profundidad b (m)	$\rho = 2\pi DR$	$\rho = \frac{4\pi RD}{1 + \frac{2D}{\sqrt{D^2 + 4 * p^2}} - \frac{D}{\sqrt{D^2 + p^2}}}$
3	38.1	1	0.3	239.39	272.47
	4.8	2	0.3	60.32	62.61
	1.08	4	0.3	27.14	27.41
	0.53	6	0.3	19.98	20.07
	0.32	8	0.3	16.08	16.12
	0.08	16	0.3	8.04	8.05

Elaboración Propia.

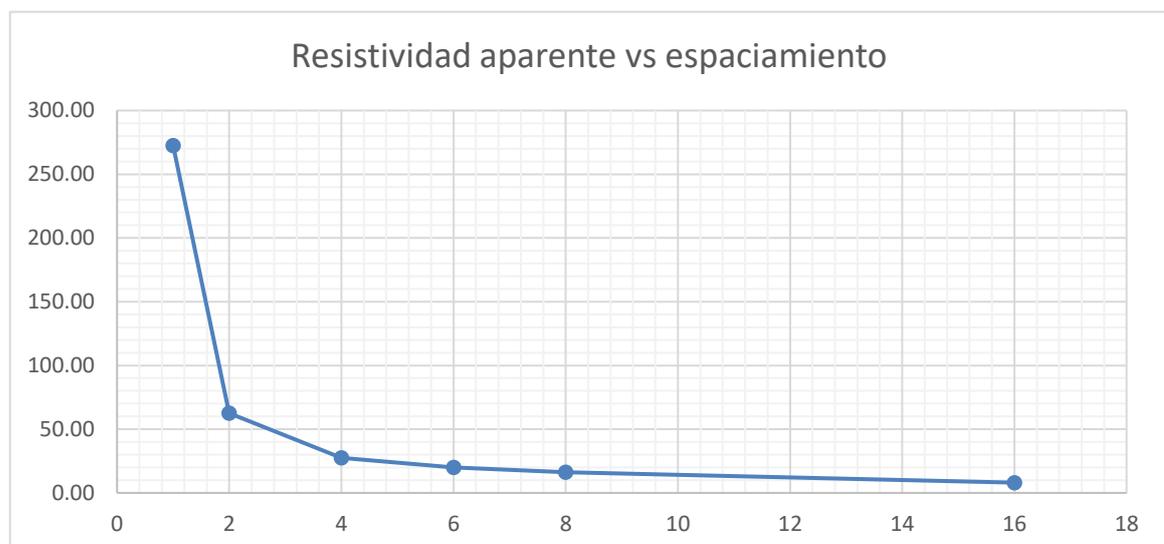


Figura 36: Resistividad aparente vs Espaciamento trayectoria 3.

Elaboración Propia.



Figura 37: Instalación de jabalinas trayectoria N°3.
Elaboración propia.



Figura 38: Lectura del instrumento trayectoria N°2.
Elaboración propia.

Trayectoria N°04

Para la trayectoria N°4, la resistividad, en términos de las unidades de longitud en las que se miden a y b, para la primera medición es:

$$\rho = \frac{4 \times \pi \times 1 \times 29.1}{1 + \frac{2 \times 1}{\sqrt{1^2 + 4 \times 0.3^2}} - \frac{1}{\sqrt{1^2 + 0.3^2}}} = 208.11 \Omega \cdot m$$

Los demás cálculos se registran en la siguiente tabla:

Tabla 7: Resistividad aparente vs espaciamento trayectoria 4.

Trayectoria	Lectura del instrumento R (Ω)	Distancia D (m)	Profundidad b (m)	$\rho = 2\pi DR$	$\rho = \frac{4\pi RD}{1 + \frac{2D}{\sqrt{D^2 + 4 \cdot p^2}} - \frac{D}{\sqrt{D^2 + p^2}}}$
4	29.1	1	0.3	182.84	208.11
	3.92	2	0.3	49.26	51.13
	0.79	4	0.3	19.85	20.05
	0.55	6	0.3	20.73	20.82
	0.3	8	0.3	15.08	15.12
	0.08	16	0.3	8.04	8.05

Elaboración Propia.



Figura 39: Resistividad aparente vs Espaciamento trayectoria 4.

Elaboración Propia.



Figura 40: Instalación de jabalinas trayectoria N°4.
Elaboración propia.



Figura 41: Lectura del instrumento trayectoria N°4.
Elaboración propia.

4.1.1. Modelado del Suelo

Con los valores de la resistividad aparente calculado a partir de las mediciones realizadas en campo procedemos realizar el modelamiento del terreno:

De acuerdo al método gráfico de Sunde para modelado de suelo de dos capas tenemos el procedimiento siguiente para la trayectoria N° 1:

- a) Gráfico de la resistividad aparente ρ_a en el eje “y” en función a la distancia entre clavijas en el eje “x”.

Tabla 8: Resistividad aparente del terreno trayectoria 1.

Trayectoria	Distancia D (m)	$\rho = \frac{4\pi RD}{1 + \frac{2D}{\sqrt{D^2 + 4 * p^2}} - \frac{D}{\sqrt{D^2 + p^2}}}$
1	1	121.15
	2	46.96
	4	21.83
	6	18.55
	8	7.56
	16	5.03

Elaboración Propia.



Figura 42: Resistividad aparente vs espaciamento trayectoria 1.

Elaboración Propia.

- b) Estimamos ρ_1 y ρ_2 a partir de los valores máximo y mínimo de la resistividad aparente.

Asumimos que: $\rho_2 = 121.15 \Omega \cdot m$ y $\rho_1 = 5.03 \Omega \cdot m$

- c) Determinamos ρ_2/ρ_1 y seleccionamos una curva en el gráfico de Sunde.

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{121.15}{5.03} \approx 24.09$$

d) Seleccionamos el valor en el eje y de ρ_a/ρ_1 dentro de la región

inclinada de la curva ρ_2/ρ_1 gráfico de Sunde.

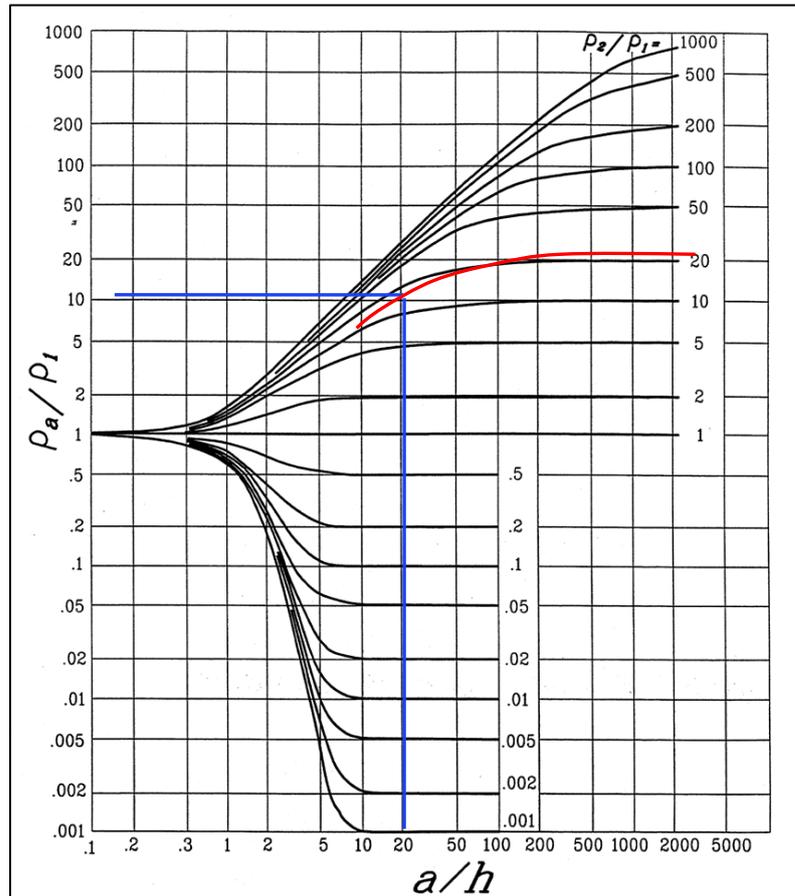


Figura 43: Grafico de Sunde trayectoria 1.
Elaboración propia.

El valor de $\frac{\rho_a}{\rho_1} = 12.54$

e) El valor correspondiente de a/h en el eje x.

$$\frac{a}{h} = 14$$

f) Calculamos ρ_a multiplicando el valor seleccionado, ρ_a/ρ_1 , por ρ_1 .

$$\rho_a = 12.54\rho_1 = 12.54(5.03) = 63.09 \Omega \cdot m$$

- g) El espaciado de las clavijas (a) correspondiente en el gráfico de resistividad aparente ρ_a calculado en el paso f).

$$\rho_a = 63.09 \Omega \cdot m$$



Figura 44: Proyección de la altura trayectoria 1.

Elaboración propia.

$$a = 1.8m.$$

- h) Calculamos h, la profundidad del nivel superior, utilizando la separación de sonda apropiada, a.

$$\frac{a}{h} = 14$$

$$h = \frac{a}{14} = \frac{1.8}{14} = 0.13 m$$

Los datos obtenidos para este caso son los siguientes:

- Resistividad de la capa superficial $\rho_2 = 121.15 \Omega \cdot m$
- Resistividad de la capa más profunda $\rho_1 = 5.03 \Omega \cdot m$
- Profundidad de la capa superficial $h = 0.13 m$

Como criterio para elegir el valor de diseño, puesto que la capa superficial es de 13 centímetros, podemos discriminar este valor y con la ayuda del software IPI2win, determinamos la resistividad de diseño; para la trayectoria 01 tenemos lo siguiente:

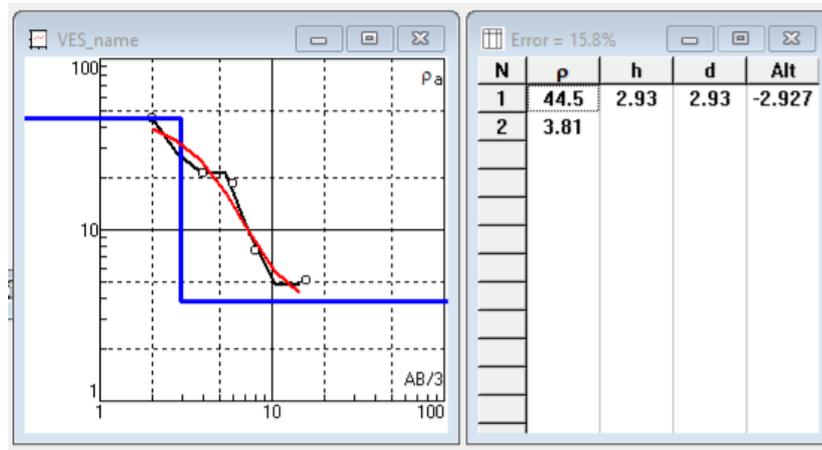


Figura 45: Resistividad del terreno.

Fuente: Software IPI2win (Esp).

- Resistividad del terreno $\rho = 44.5 \Omega. m$
- Profundidad de la capa superficial $h = 2,93 m$
- Error $\% = 15.8$ (lo cual es aceptable)

De acuerdo al método gráfico de Sunde para modelado de suelo de dos capas tenemos el procedimiento siguiente para la trayectoria 2:

- a) Gráfico de la resistividad aparente ρ_a en el eje “y” en función a la distancia entre clavijas en el eje “x”.

Tabla 9: Resistividad aparente del terreno trayectoria 2.

Trayectoria	Distancia D (m)	$\rho = \frac{4\pi RD}{1 + \frac{2D}{\sqrt{D^2 + 4 * p^2}} - \frac{D}{\sqrt{D^2 + p^2}}}$
2	1	178.79
	2	76.44
	4	23.86
	6	21.58
	8	13.10
	16	6.04

Elaboración Propia

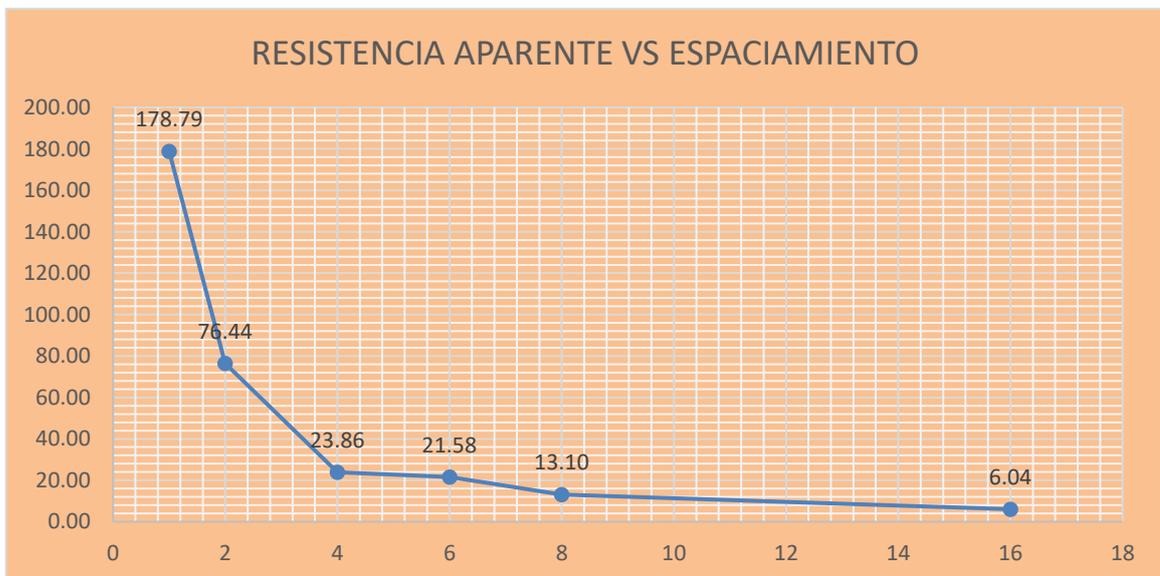


Figura 46: Resistividad aparente vs espaciamento trayectoria 2.

Elaboración Propia.

- b) Estimamos ρ_1 y ρ_2 a partir de los valores máximo y mínimo de la resistividad aparente.

Se verifica que: $\rho_2 = 178.79 \Omega \cdot m$ y $\rho_1 = 6.04 \Omega \cdot m$

- c) Determinamos ρ_2/ρ_1 y seleccionamos una curva en el gráfico de Sunde.

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{178.79}{6.04} \approx 29.62$$

- d) Seleccionamos el valor en el eje y de ρ_a/ρ_1 dentro de la región inclinada de la curva ρ_2/ρ_1 gráfico de Sunde.

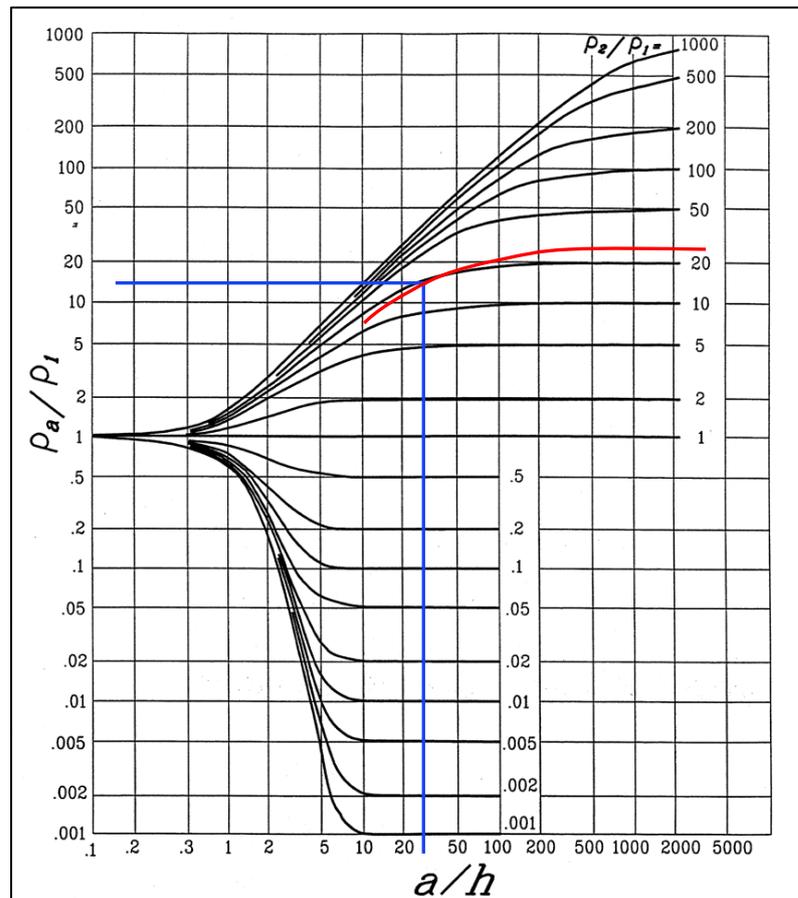


Figura 47: Gráfico de Sunde trayectoria 2.

Elaboración propia.

El valor de $\frac{\rho_a}{\rho_1} = 15.31$

- e) El valor correspondiente de a/h en el eje x.

$$\frac{a}{h} = 19$$

- f) Calculamos ρ_a multiplicando el valor seleccionado, ρ_a/ρ_1 , en (d) por

ρ_1 .

$$\rho_a = 15.31\rho_1 = 15.31(19) = 92.41 \Omega \cdot m$$

- g) El espaciado de las clavijas (a) correspondiente en el gráfico de resistividad aparente ρ_a calculado en el paso f).

$$\rho_a = 92.41 \Omega. m$$

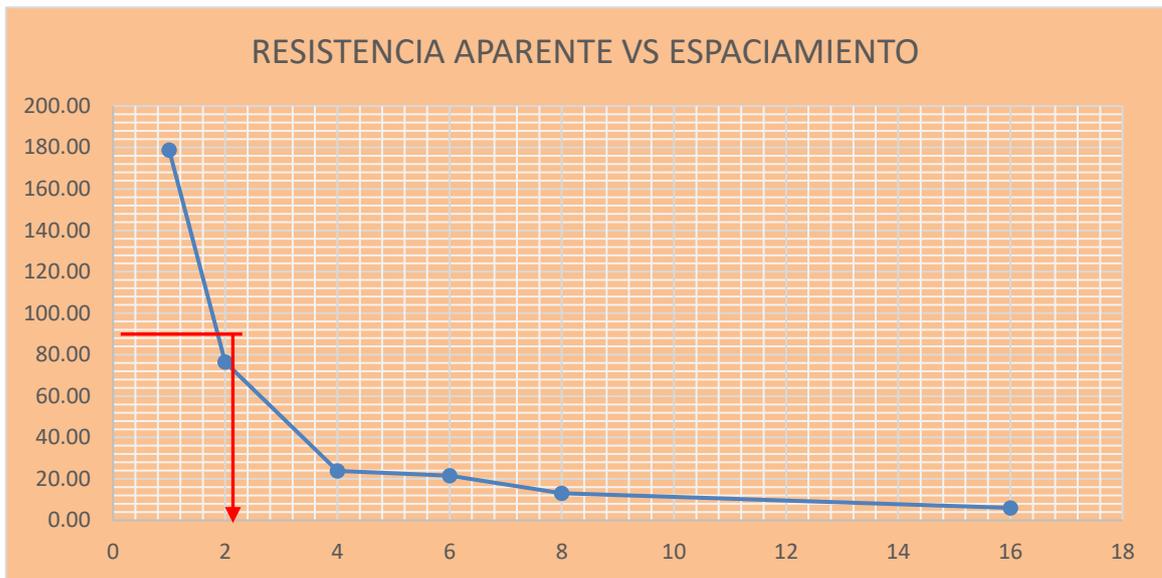


Figura 48: Proyección de la altura trayectoria 2.

Elaboración propia.

$$a = 1.9m.$$

- h) Calculamos h , la profundidad del nivel superior, utilizando la separación de sonda apropiada, a .

$$\frac{a}{h} = 19$$

$$h = \frac{a}{19} = \frac{1.9}{19} = 0.10$$

Los datos obtenidos para este caso son los siguientes:

- Resistividad de la capa superficial $\rho_2 = 178.79 \Omega. m$
- Resistividad de la capa más profunda $\rho_1 = 6.04 \Omega. m$
- Profundidad de la capa superficial $h = 0,10 m$

$$\rho_d = \frac{\rho_{max} + \rho_{min}}{2} \Omega. m$$

Para elegir el valor de diseño, puesto que la capa superficial es de 0.39 centímetros, podemos discriminar este valor y con la ayuda del software IPI2win, determinamos la resistividad de diseño; para la trayectoria 02 tenemos lo siguiente:

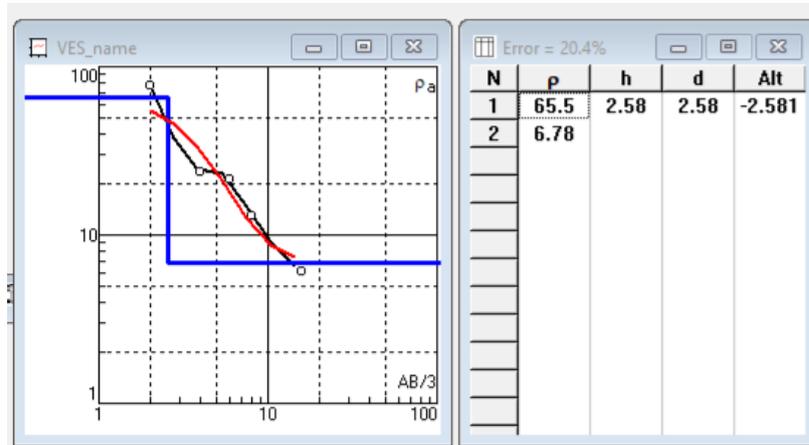


Figura 49: Resistividad del terreno.

Fuente: Software IPI2win (Esp).

- Resistividad del terreno $\rho = 65.5 \Omega \cdot m$
- Profundidad de la capa superficial $h = 2.58 m$
- Error $\% = 20.4$ (lo cual es aceptable)

De acuerdo al método gráfico de Sunde para modelado de suelo de dos capas tenemos el procedimiento siguiente para la trayectoria 3:

- a) Gráfico de la resistividad aparente ρ_a en el eje “y” en función a la distancia entre clavijas en el eje “x”.

Tabla 10: Resistividad aparente del terreno perfil 3.

Trayectoria	Distancia D (m)	$\rho = \frac{4\pi RD}{1 + \frac{2D}{\sqrt{D^2 + 4 * p^2}} - \frac{D}{\sqrt{D^2 + p^2}}}$
3	1	272.47
	2	62.61
	4	27.41
	6	20.07
	8	16.12
	16	8.05

Elaboración Propia.

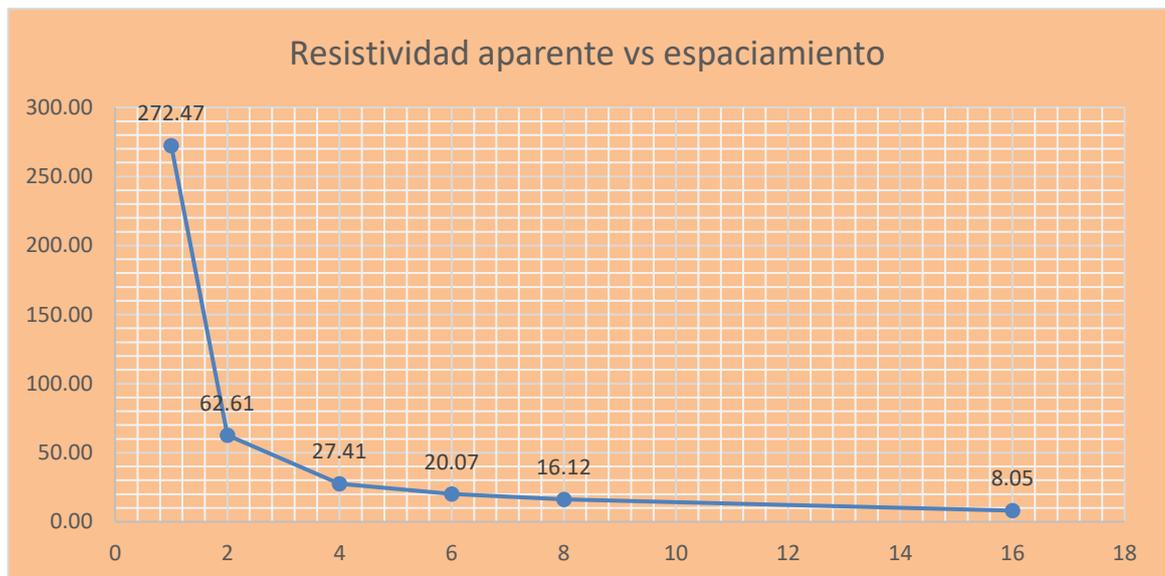


Figura 50: Resistividad aparente vs espaciamento trayectoria 3.

Elaboración Propia.

- b) Estimamos ρ_1 y ρ_2 a partir de los valores máximo y mínimo de la resistividad aparente.

Se verifica que: $\rho_2 = 272.47 \Omega. m$ y $\rho_1 = 8.05 \Omega. m$

- c) Determinamos ρ_2/ρ_1 y seleccionamos una curva en el gráfico de Sunde.

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{272.47}{8.05} \approx 33.86$$

- d) Seleccionamos el valor en el eje y de ρ_a/ρ_1 dentro de la región inclinada de la curva ρ_2/ρ_1 gráfico de Sunde.

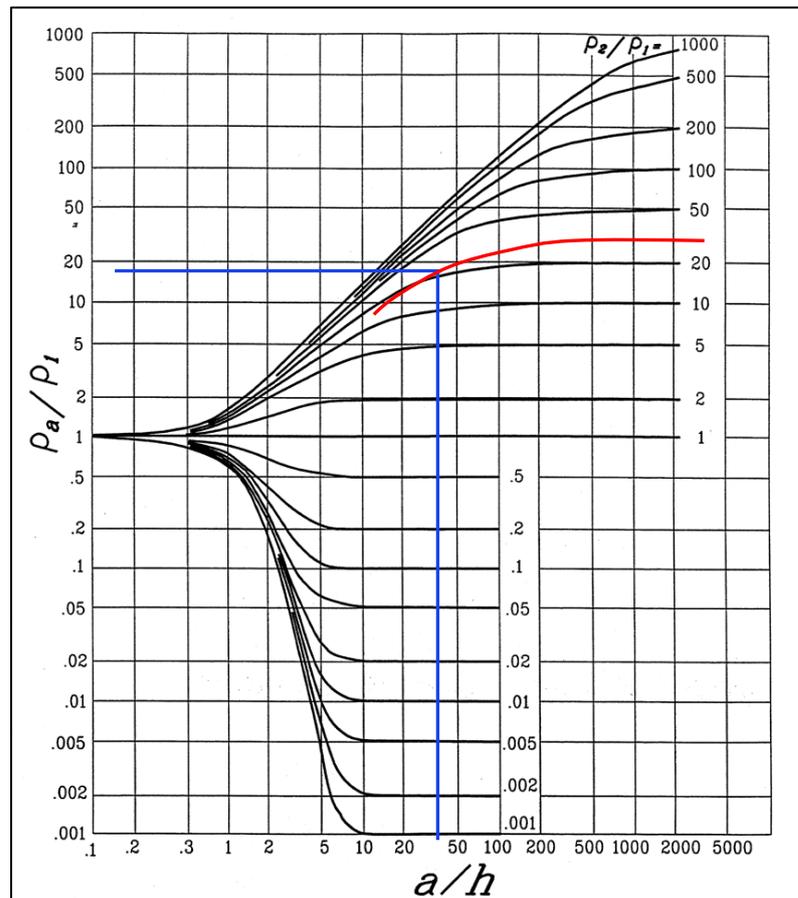


Figura 51: Gráfico de Sunde trayectoria 3.
Elaboración propia.

El valor de $\frac{\rho_a}{\rho_1} = 17.43$

- e) El valor correspondiente de a/h en el eje x.

$$\frac{a}{h} = 25$$

- f) Calculamos ρ_a multiplicando el valor seleccionado, ρ_a/ρ_1 , en (d) por ρ_1 .

$$\rho_a = 17.432\rho_1 = 17.43(8.05) = 140.26 \Omega \cdot m$$

- g) El espaciado de las clavijas (a) correspondiente en el gráfico de resistividad aparente ρ_a calculado en el paso f).

$$\rho_a = 140.26 \Omega \cdot m$$



Figura 52: Proyección de la altura trayectoria 3.

Elaboración propia.

$$a = 1.8m.$$

- h) Calculamos h , la profundidad del nivel superior, utilizando la separación de sonda apropiada, a .

$$\frac{a}{h} = 25$$

$$h = \frac{a}{25} = \frac{1.8}{25} = 0.07$$

Los datos obtenidos para este caso son los siguientes:

- Resistividad de la capa superficial $\rho_2 = 272.47 \Omega \cdot m$
- Resistividad de la capa más profunda $\rho_1 = 8.05 \Omega \cdot m$
- Profundidad de la capa superficial $h = 0,07 m$

Para elegir el valor de diseño, puesto que la capa superficial es de 7 centímetros, podemos discriminar este valor y con la ayuda del software IP12win, determinamos la resistividad de diseño; para la trayectoria 03 tenemos lo siguiente:

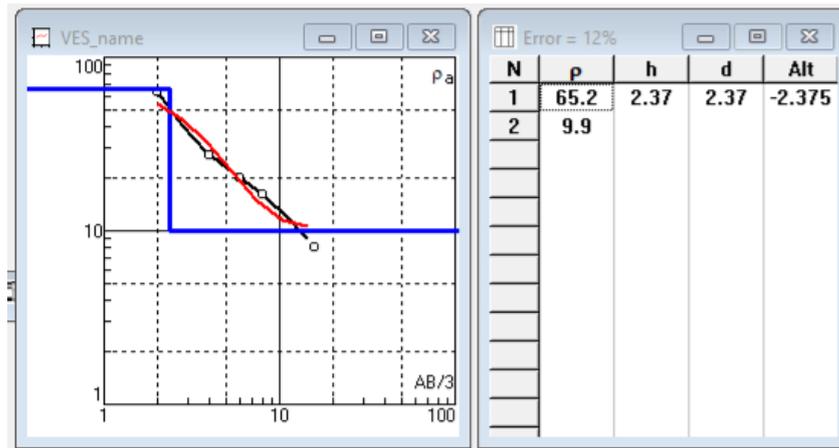


Figura 53: Resistividad del terreno.

Fuente: Software IPI2win (Esp).

- Resistividad del terreno $\rho = 65.2 \Omega \cdot m$
- Profundidad de la capa superficial $h = 2.37 m$
- Error $\% = 12$ (lo cual es aceptable)

De acuerdo al método gráfico de Sunde para modelado de suelo de dos capas tenemos el procedimiento siguiente para la trayectoria 4:

- a) Gráfico de la resistividad aparente ρ_a en el eje “y” en función a la distancia entre clavijas en el eje “x”.

Tabla 11: Resistividad aparente del terreno trayectoria 4.

Trayectoria	Distancia D (m)	$\rho = \frac{4\pi RD}{1 + \frac{2D}{\sqrt{D^2 + 4 * p^2}} - \frac{D}{\sqrt{D^2 + p^2}}}$
4	1	208.11
	2	51.13
	4	20.05
	6	20.82
	8	15.12
	16	8.05

Elaboración Propia.



Figura 54: Resistividad aparente vs espaciamiento trayectoria 4.
Elaboración Propia.

- b) Estimamos ρ_1 y ρ_2 a partir de los valores máximo y mínimo de la resistividad aparente.

Se verifica que: $\rho_2 = 208.11 \Omega \cdot m$ y $\rho_1 = 8.05 \Omega \cdot m$

- c) Determinamos ρ_2/ρ_1 y seleccionamos una curva en el gráfico de Sunde.

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{208.11}{8.05} \approx 25.86$$

- d) Seleccionamos el valor en el eje y de ρ^a/ρ_1 dentro de la región inclinada de la curva ρ^a/ρ_1 gráfico de Sunde.

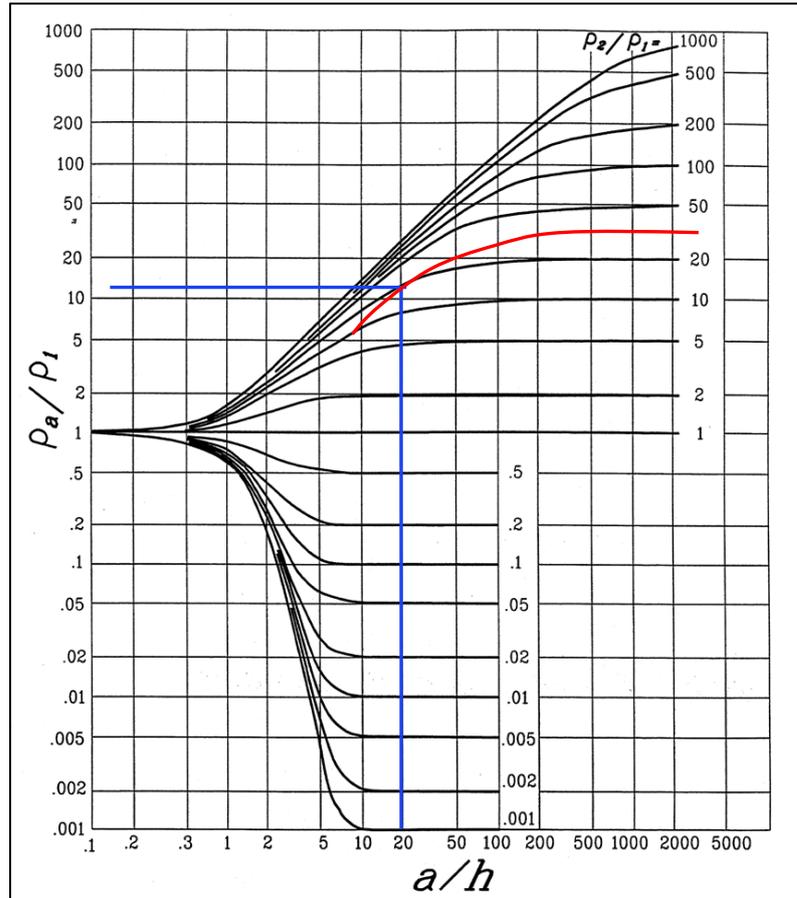


Figura 55: Grafico de Sunde trayectoria 4.
Elaboración propia.

El valor de $\frac{\rho_a}{\rho_1} = 13.43$

e) El valor correspondiente de $\frac{a}{h}$ en el eje x.

$$\frac{a}{h} = 14$$

f) Calculamos ρ_a multiplicando el valor seleccionado, $\frac{\rho_a}{\rho_1}$, en (d) por ρ_1 .

$$\rho_a = 13.43\rho_1 = 13.43(8.05) = 108.08 \Omega \cdot m$$

g) El espaciado de las clavijas (a) correspondiente en el gráfico de resistividad aparente ρ_a calculado en el paso f).

$$\rho_a = 108.08 \Omega \cdot m$$

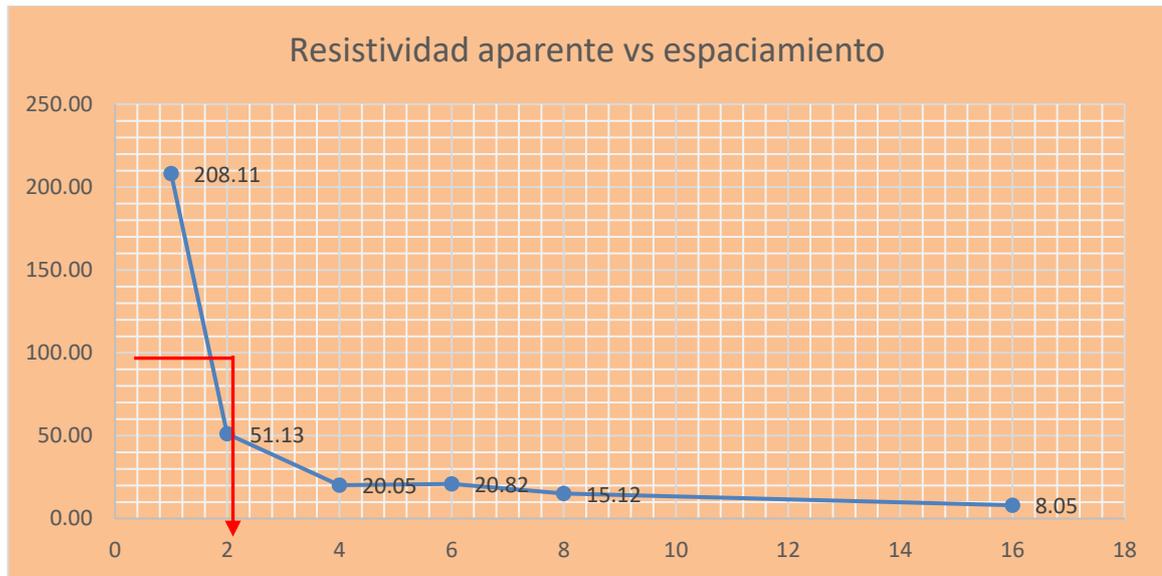


Figura 56: Proyección de la altura trayectoria 4.

Elaboración propia.

$$a = 1.5 \text{ m.}$$

- h) Calculamos h , la profundidad del nivel superior, utilizando la separación de sonda apropiada, a .

$$\frac{a}{h} = 14$$

$$h = \frac{a}{14} = \frac{1.5}{14} = 0.11$$

Los datos obtenidos para este caso son los siguientes:

- Resistividad de la capa superficial $\rho_2 = 208.11 \Omega \cdot m$
- Resistividad de la capa más profunda $\rho_1 = 8.05 \Omega \cdot m$
- Profundidad de la capa superficial $h = 0.11 \text{ m}$

Para elegir el valor de diseño, puesto que la capa superficial es de 11 centímetros, podemos discriminar este valor y con la ayuda del software IP12win, determinamos la resistividad de diseño; para la trayectoria 03 tenemos lo siguiente:

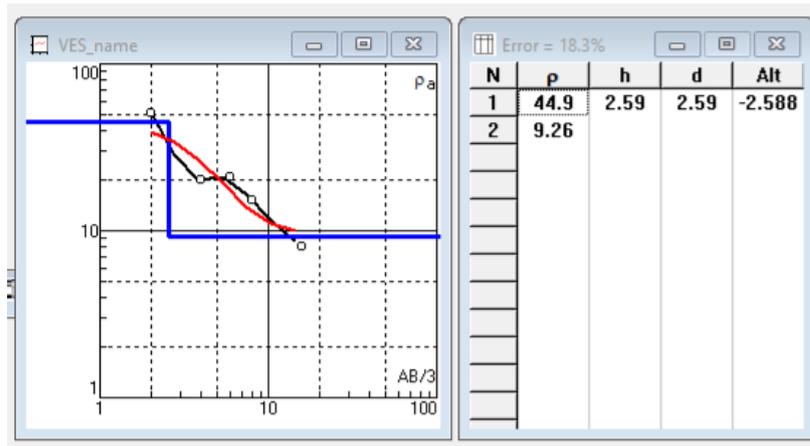


Figura 57: resistividad del terreno.

Fuente: Software IPI2win (Esp).

- Resistividad del terreno $\rho = 44.9 \Omega \cdot m$
- Profundidad de la capa superficial $h = 2.59 m$
- Error $\% = 18.3$ (lo cual es aceptable)

4.2. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

De acuerdo al método recomendado por la IEEE 142 2007 tabla 4.5 la resistencia a tierra para un solo electrodo se calcula utilizando la formula siguiente de acuerdo a lo establecido en el método del capítulo 3:

$$R = \frac{\rho_2}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r_1} - 1 \right)$$

En donde:

R: Resistencia de tierra en Ω

ρ : Resistividad del suelo en $\Omega \cdot m = 44.50$, para la trayectoria 1.

r : Radio del electrodo = 0.01905 m (corresponde a $\frac{3}{4}$ de pulgada)

l : Longitud de la varilla m = 2.4 m

$$R = \frac{44.50}{2\pi * 2.4} \left(\ln \frac{4 * 2.4}{0.01905} - 1 \right) = 15.41 \Omega$$

Siguiendo el mismo procedimiento de cálculo se obtiene los resultados que se registran en la siguiente tabla:

Tabla 12: Calculo de la Resistencia.

Trayectoria	Longitud del electrodo (L)	Radio del electrodo (r)	Resistividad de diseño (ρ)	$R = \frac{\rho_2}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r_1} - 1 \right)$
1	2.4	0.01905	44.50	15.41
2	2.4	0.01905	65.50	22.68
3	2.4	0.01905	65.20	22.58
4	2.4	0.01905	44.90	15.55

Elaboración propia.

Podemos concluir de acuerdo a los cálculos realizados con los datos de diseño de la resistividad para las cuatro trayectorias que la situación más desfavorable es la resistencia de 22.68 Ohmios que corresponde a la trayectoria 4.

4.3. INFLUENCIA DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA TRATADO ELECTROQUÍMICAMENTE

De acuerdo a la metodología planteada en el capítulo anterior, se realiza el cálculo de la resistencia de puesta a tierra con el tratamiento electroquímico, para este caso se utiliza el cemento conductor cuyas características son las que especifica el fabricante. Para el cálculo se utiliza la formula siguiente:

Donde:

$$R_{CE-ros} = \frac{1}{2\pi L_r} \left\{ \rho \left[\ln \left(\frac{8L_r}{D_c} \right) - 1 \right] + \rho_c \left[\ln \left(\frac{8L_r}{d} \right) - 1 \right] - \rho_c \left[\ln \left(\frac{8L_r}{D_c} \right) - 1 \right] \right\}$$

Donde:

R_{CE-rod} : Resistencia producto del compuesto mejorador del suelo.

ρ_c : es la resistividad del concreto = $0.25 \Omega \cdot m$.

ρ : es la resistividad del suelo en $\Omega \cdot m$.

D_c : es el diámetro de la cáscara de concreto = $0.3 m$.

d : es el diámetro de la varilla = $0.01905 m$.

L_r : es la longitud de la varilla = $2.4 m$.

Tabla 13: Resistencia con tratamiento electroquímico.

Longitud del electrodo (Lr) m	Resistividad del concreto (ρ_c) $\Omega \cdot m$	Diámetro de la varilla de tierra (d) m	Resistividad del terreno (ρ)	Diametro del encapsulado de concreto (D) m	Resistencia producto del compuesto mejorador del suelo
3	0.25	0.01905	44.50	0.3	8.02
3	0.25	0.01905	65.50	0.3	11.79
3	0.25	0.01905	65.20	0.3	11.74
3	0.25	0.01905	44.90	0.3	8.09

Elaboración Propia.

Concluimos de acuerdo al cálculo realizado que el valor de la resistencia de la puesta a tierra en la condición más desfavorable es de 11.79 Ohmios y el promedio de la puesta a tierra tratada electroquímicamente es 9.9 ohmios, con lo que se prueba la



efectividad del tratamiento con el compuesto mejorador del terreno (cemento conductivo).



V. CONCLUSIONES

- Se valora la resistividad del terreno mediante el método de Wenner también conocido como el método de los cuatro puntos, con las mediciones en campo identificamos que el terreno no es uniforme, teniendo una capa superficial con mayor resistividad que la capa inferior, mediante el método gráfico de Sunde se ha determinado la profundidad de la capa superior que como resultado es de 0.13, 0.10, 0.07, 0.11 m; pudiendo discriminar esta capa; con los datos obtenidos se calculó la resistividad de diseño y se tiene como resultado lo siguiente: para la trayectoria N°1, la resistividad de diseño de acuerdo al criterio planteado 44.50 ohmios por metro; para la trayectoria N°2, la resistividad de diseño es 65.50 ohmios por metro; para la trayectoria N°3, la resistividad de diseño es 65.20 ohmios por metro; para la trayectoria N°4, la resistividad de diseño es 44.90 ohmios por metro, con estos resultados se calculó la resistencia de tierra con un electrodo que nos da un valor máximo de 22.68 Ohmios como máximo.
- Con el tratamiento electroquímico se reduce la resistividad natural del suelo, siendo la condición más desfavorable de 11.79 Ohmios y el promedio de la puesta a tierra tratada es 9.9 ohmios, con lo que se prueba la efectividad del tratamiento con el compuesto mejorador del terreno (cemento conductivo).



VI. RECOMENDACIONES

- Para los egresados de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica se recomienda continuar con este tipo de investigaciones referentes a los Sistemas de Puesta a Tierra, utilizando diferentes tipos de tratamientos electroquímicos u otros métodos con la finalidad de tener los métodos científicos para mejorar la resistencia de los sistemas a tierra.
- A las instituciones se recomienda aplicar el método descrito en la presente tesis con la finalidad de poder tener diseños adecuados de los sistemas de protección mediante el sistema de puesta a tierra.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Androvitsaneas, V. P., Gonos, I. F., & Stathopoulos, I. A. (2015). Experimental study on transient impedance of grounding rods encased in ground enhancing compounds. *Electric Power Systems Research*. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.11.032>
- Arturo Galvan D., Gilberto Pretelln G, E. G. E. (2010). Practical Evaluation of Ground Enhancing Compounds for. *30th International Conference on Lightning Protection - ICLP 2010, m, 3–6*.
- Basham, D., Wright, J., Ferguson, K., & Moy, G. (2005). *Unified Facilities Criteria (Ufc) Electrical Power Supply and Distribution* (Issue March).
- Clemente, J. M. (1991). *INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA EN CENTROS DE TRANSFORMACIÓN* (A.S.A. (ed.); Segunda Ed). ASOCIACIÓN DE ABASTECIMIENTOS DE AGUA Y SANEAMIENTOS DE ANDALUCIA.
- Committee, S., Power, I., & Society, E. (2012). *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity , Ground Impedance , and Earth Surface Potentials of a Grounding System IEEE Power and Energy Society* (Vol. 2012, Issue December).
- DeCosta, D., Brown, R., & Sheh, W. (2012). *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity , Ground Impedance , and Earth Surface Potentials of a Grounding System* (I. P. and E. Society (ed.); 1º). IEEE.
- EMCS, SLHC, & TCTS. (1987). *Military handbook GROUNDING, BONDING, AND SHIELDING FOR ELECTRONIC EQUIPMENTS AND FACILITIES* (Vol. 1, Issue December, p. 812). DEPARTMENT OF DEFENSE.
- García, R. (1999). *La Puesta A Tierra De Instalaciones Electricas*.
- Gazzana, D. S., Smorgonskiy, A., Mora, N., Sunjerga, A., Rubinstein, M., & Rachidi, F. (2018). *An experimental field study of the grounding system response of tall wind turbines to impulse surges*. 160, 219–225.



- <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.02.020>
- Keil, R. P., & Merryman, J. D. (2000). *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding* (I. The Institute of Electrical and Electronics Engineers (ed.); 1°, Vol. 2000). IEEE Power Engineering Society.
- Kontargyri, V. T., Gonos, I. F., & Stathopoulos, I. A. (2015). *Study on wind farm grounding system. 9994(c)*. <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2418315>
- Luiz, V., Piantini, A., Almaguer, H. A. D., Coelho, R. A., Boaventura, C., Osvaldo, J., & Paulino, S. (2015). The influence of seasonal soil moisture on the behavior of soil resistivity and power distribution grounding systems. *Electric Power Systems Research, 118*, 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.07.027>
- Manuel, R., Velásquez, A., Vanessa, J., & Lara, M. (2019). Failures in overhead lines grounding system and a new improve in the IEEE and national standards. *Engineering Failure Analysis, 100*(December 2018), 103–118. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.02.033>
- MEM. (2012). *ELECTRICIDAD* (Issue CÓDIGO NACIONAL DE (SUMINISTRO 2011) ELECTRICIDAD MINIST, p. 326). MEM.
- Mukhedkar, D., & Dawalibi, F. (1984). *An American National Standard IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity , Ground Impedance , and Earth Surface Potentials of a Ground System* (I. P. E. Society (ed.); 1°). The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- Rand, K. R. (2000). *Lightning Protection & Grounding Solutions for Communication Sites* (PolyPhaser (ed.); FIRST EDIT). PolyPhaser.
- Rappaport, E., & Mohla, D. C. (2007). *Grounding of Industrial and Commercial Power Systems* (P. S. E. Committee (ed.); Std 142-20, Vol. 2007). IEEE Industry Applications Society.



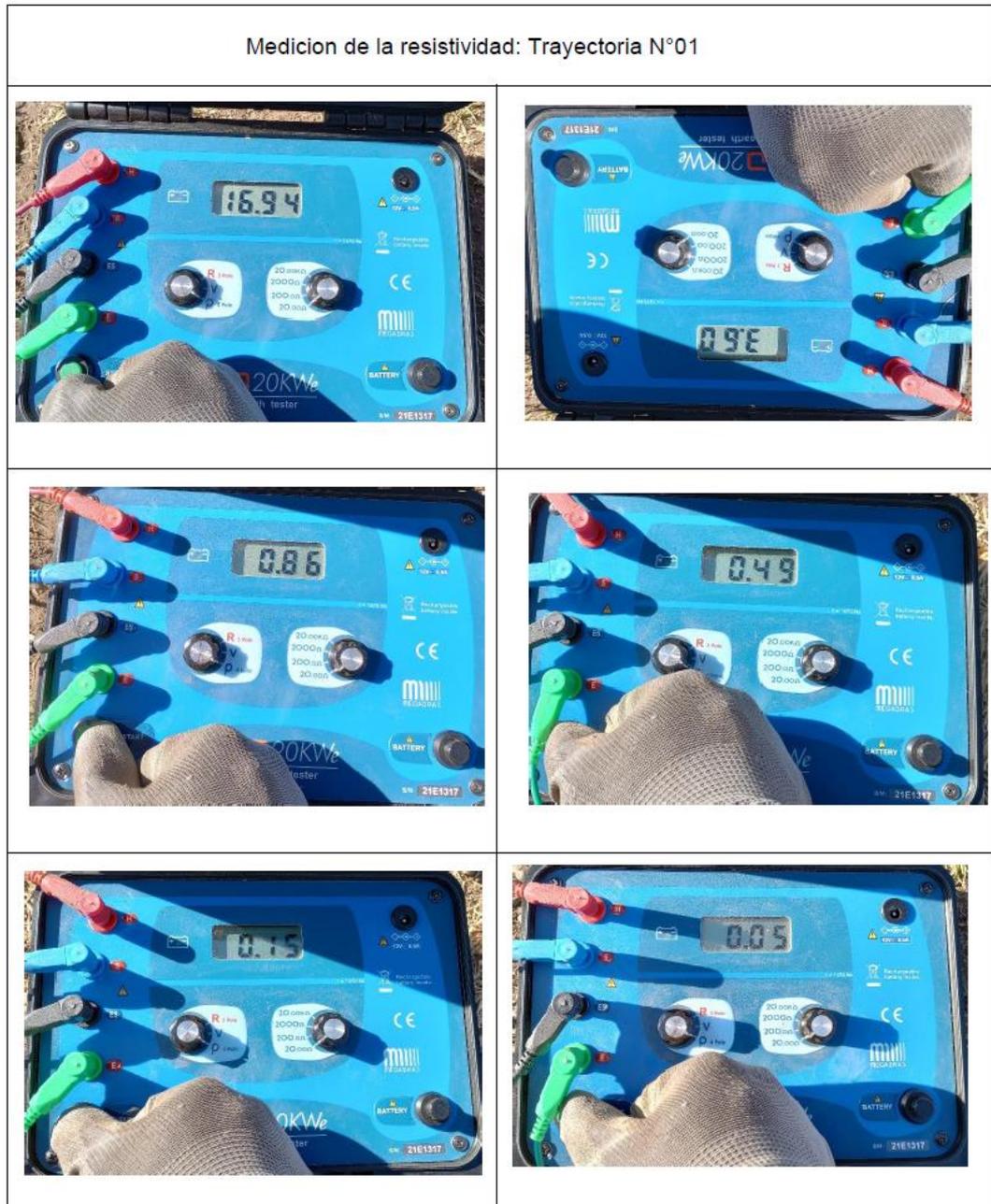
Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, M. del P. B. (2010). *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN* (S. A. D. C. . McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES (ed.); Quinta edi). McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

Short, T. A. (2004). *Electric Power Distribution Handbook* (C. PRESS (ed.); 1°, Issue C).

Switzer, K. (1999). *Practical Guide to Electrical Grounding* (ERICO (ed.); First Edit).
Electrical Protection Products. kswitzer@erico.com

ANEXOS

ANEXO A: PANEL FOTOGRÁFICO





ANEXO B: CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

 A KIEGASER Group Company	7330 NW 66 TH STREET, MIAMI, FLORIDA 33166, USA PHONE: +1 (305) 938-0389 FAX: +1 (305) 513-4493 www.tentech.us	Earth Tester MTD-20KWe	
		Certificate No. 54 1 6 3 7	June 2, 2021

Calibration Certificate

To

Equipment: *Megabras MTD-20KWe.*

Serial No.: 21E1317

Date of calibration : 06/02/2021

Calibration procedure

The calibration procedure used was based on the recommendations of the IEC 17025 Standard, in the technical instruction L0014 (rev 3.1) and in the manuals of operation of the involved instruments.

Used Standards

RESISTANCE DECADE BOX I, YOKOGAWA model 2786-20 Serial number 01017, with calibration certificate No. 174181_101 issued by IPT on 06/19/2019, validity for 2 year.

Fluke 8845A, 6 ½ digits, digital multimeter, serie N° 5361014 with calibration certificate N° F8568033 , issued on APRIL 19, 2021 by Everett in accordance with the Fluke Calibration Quality System document QSD 111.0., validity for 2 year.

Fluke 8845A, 6 ½ digits, digital multimeter, serie N° 5361016 with calibration certificate N°F8568028 , issued on APRIL 19, 2021 by Everett in accordance with the Fluke Calibration Quality System document QSD 111.0., validity for 2 year.

Uncertainties

The conventional true values are affected with the following uncertainties:

Voltage : $\pm 0,5\%$

Resistance: $\pm 0,5\%$

True Value: Value of standars (or read on standards) with declared uncertainties.

Enviromental conditions

Room temperature:

24 \pm 2 °C

Relative humidity:

31 \pm 5%

Voltage Measurement:

Máximum admissible error : $\pm (2 \% \text{ read value} + 1 \% \text{ of the full range})$.

True Value (V)		Error (V)	Maximum admissible error \pm (V)
50.2	50.2	0	3.00
100.8	100.6	-0.2	4.02
150.7	150.5	-0.2	5.01

The reproduction of this document will only be able to be integral.



 <small>A TEGE-ABBAS Partner Company</small>	7330 NW 66 TH STREET, MIAMI, FLORIDA 33166, USA PHONE: +1 (305) 938-0389 FAX: +1 (305) 513-4493 www.tentech.us		Earth Tester MTD-20KWe
	Certificate No. 54 1 6 3 7	June 2, 2021	Page: 2 / 2

Results: All test were satisfactory in this equipment.

Range	True Value (of the standard) (*)	Read Value (*)	Error (*)	Maximum admissible error ± (*)
20,00 Ω	2	2.01	0.01	0.24
	10.01	10.02	0.01	0.40
	18.01	18.19	0.18	0.56
200,0 Ω	30	29.4	-0.6	2.60
	100.05	100	-0.05	4.00
	180.07	180.3	0.23	5.60
2000 Ω	300.1	293	-7.1	26.00
	1000	1003	3	40.00
	1800	1813	13	56.00
20,00 kΩ	3	3.11	0.11	0.26
	10	10.27	0.27	0.40
	18	17.82	-0.18	0.56

* Value expressed in the same unit showed in the range in use.

Results: All test were satisfactory in this equipment.

Withstand Voltage test: Applied 3 kV (ac), during 1 minute and no electrical current was detected.

Used Terms

True Value: Value of standars (or read on standards) with declared uncertainties.

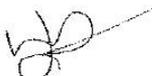
Observations

This Certified of Calibration it is valid only for the tested unit, not being extensive to any lots, even if it is similar.

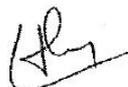
The reproduction of this document will only be able to be integral.

All these certificates are traceable to National and International standards and are in compliance with iso/IEC 17025.

Calibrated by:


Luis Chan

Supervisor:


Jorge Sotolongo

The reproduction of this document will only be able to be integral.

ANEXO C: FICHA TÉCNICA DEL ADITIVO

THOR CEM[®]



CUMPLE CON LA NORMA
IEC 62561 - 7

IDENTIFICACIÓN

Nombre comercial : **Cemento Conductivo
THOR CEM**

Nombre químico : **No especificado**

Fórmula : **No especificado**

NOTA: Este producto no tiene fórmula ni nombre químico especificado, debido a que es una mezcla y no un producto de reacción.

PRESENTACIÓN

THOR CEM es un cemento conductivo elaborado en base a grafito de alta pureza que al ser aplicado en un sistema de puesta a tierra incrementa el área de contacto de los electrodos, disminuyendo significativamente la resistencia eléctrica del sistema.

THOR CEM protege todo electrodo metálico de la corrosión, impidiendo el contacto directo con el terreno natural, prolongando así su vida útil.

THOR CEM cumple con el D.S. N° 024-2016-EM y puede ser adquirido en nuestras 2 presentaciones de 25kg y 11.5kg.

para rayos

COMPONENTES	NÚMERO CAS
Grafito	7782-42-5
Cemento	65997-15-1

PROPIEDADES

ELÉCTRICAS	
Tipo	Conductivo
Conducción	Electrónica e iónica
Resistividad	< 0.50 ohm.m

FÍSICAS	
Estado físico	Sólido
Color	Gris oscuro
Apariencia	Polvo
Olor	Sin olor
Granulometría	Malla ASTM 280 a ASTM 350
pH	11,68
Densidad seco	2,49 g/cm ³
Densidad fraguado	1,71 g/cm ³
Absorción de agua	38,30%
Resistencia a la corrosión	Reducción de 97 - 100%
Azufre Total	<2%

AMBIENTALES	
Drenado de Materiales	
Metales pesados	Concentración
Arsénico	<0.002 mg/L
Bario	0.512 mg/L
Cadmio	<0.001 mg/L
Cromo	0.321 mg/L
Plomo	<0.001 mg/L
Mercurio	<0.0001 mg/L
Selenio	<0.002 mg/L
Plata	<0.002 mg/L

► CERTIFICADO DE ENSAYOS

ENSAYO	Nº DE CERTIFICADO	RESULTADOS
Oral aguda - DL50	T-DA-17-1388	Toxicidad oral aguda: > 5000 mg/kg
Dérmica . DL50	T-DA-17-1382	Toxicidad dérmica aguda: > 4000 mg/kg
TCLP	Informe de Ensayo Nº J-00271450	Material no peligroso y no corrosivo * Límites EPA 1311
Resistividad	Protocolo de pruebas Nº PEE 17-225	Resistividad < 0,5 ohm.m * ASTM G57-06
Corrosión	Protocolo de pruebas Nº PEE 18-177	0,008152 mm-yr * ASTM G102 / IEC 62561
% Azufre	IT Nº0455-18-Labicer	1,93% (Difracción de rayos X)
Densidad en seco	T Nº0312-19-Labicer	2,49 g/cc (ASTM C188)
Absorción de agua	T Nº0312-19-Labicer	38,30% (ASTM D281)



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo ROSVALDO LIPA QUISPE,
identificado con DNI 74373678 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DEL HOSPITAL

REGIONAL MANUEL NÚÑEZ BUTRÓN PUNO, MEDIANTE TRATAMIENTO

ELECTROQUÍMICO”

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 05 de mayo del 2023

FIRMA (obligatoria)



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo ROS WALDO LIPA QUISPE,
identificado con DNI 74373678 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DEL HOSPITAL

REGIONAL MANUEL NÚÑEZ BUTRÓN PUNO, MEDIANTE TRATAMIENTO

ELECTROQUÍMICO”

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 05 de mayo del 2023

FIRMA (obligatoria)



Hueña